

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Universitaria de
Ingeniería Técnica de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE GRADO



PLANIFICACIÓN DE REDES
LTE

LEONARDO A. SCRICCA YANES

Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación
Junio 2013

(Página dejada intencionalmente en blanco)



POYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Comunicaciones móviles en entornos complejos: Planificación de redes LTE.

AUTOR: Leonardo A. Scricca Yanes

TUTOR: César Briso Rodríguez

DEPARTAMENTO: DIAC

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

VºBº

Miembros del tribunal calificador:

PRESIDENTE: Ignacio Álvarez Rocha

TUTOR: César Briso Rodríguez

SECRETARIO: Rafael Herradón Díez

Fecha de lectura: ____ de julio de 2013

Calificación:

El Secretario,

(Página dejada intencionalmente en blanco)

ÍNDICE

ÍNDICE.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABLAS	V
RESUMEN.....	VI
SUMMARY	VII
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURA.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. TERCERA GENERACIÓN (3G).....	1
1.1.1. UMTS/WCDMA	1
1.1.2. 3GPP UMTS ESPECIFICACIONES Y CONTROL	2
1.1.3. CAPACIDADES DE UMTS	2
1.1.4. FRECUENCIAS DE UMTS	3
1.1.5. CONTROL DE POTENCIA EN UMTS	3
1.1.6. CDMA PARA UMTS	4
1.2. 3G UMTS HSPA (HIGH SPEED PACKET ACCESS)	5
1.2.1. CHARACTERISTICS DE HSPA	5
1.2.2. VENTAJAS DE HSPA	5
1.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL 3G HSDPA	6
1.2.4. RENDIMIENTO DEL HSDPA.....	7
1.2.5. CARACTERÍSTICAS DEL 3G HSUPA	7
1.2.6. EVOLVED HSPA / HSPA+	8
1.3. 3G LTE (LONG TERM EVOLUTION)	8
1.3.1. EVOLUCIÓN DE 3G LTE.....	8
1.3.2. RESUMEN DE LAS ESPECIFICACIONES	9
1.3.3. PRINCIPALES TECNOLOGÍAS EN LTE.....	10
1.3.4. ANCHOS DE BANDA DE CANAL.....	11
1.3.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LTE TDD Y LTE FDD.....	11
1.3.6. FUNDAMENTOS DE MIMO EN LTE	13
1.4. WIMAX ESTANDAR IEEE 802.16.....	13
1.4.1. VERSIONES DEL IEEE 802.16	14
1.4.2. CARACTERÍSTICAS DE WiMAX.....	14
1.4.3. MIMO EN WIMAX.....	14
1.4.4. CODIFICACIÓN Y MODULACIÓN ADAPTATIVA EN WIMAX	15
2 INTERFERENCIAS	17
2.1. TIPOS DE INTERFERENCIAS.....	17
2.1.1. INTERFERENCIA CO-CANAL Y CAPACIDAD DEL SISTEMA.....	17
2.1.2. INTERFERENCIA ENTRE CANALES ADYACENTES	19
2.2. CONTROL DE POTENCIA PARA REDUCIR LAS INTERFERENCIAS	19
2.3. ICIC (COORDINACIÓN DE INTERFERENCIA ENTRE CELDAS)	20
2.3.1. ICIC (COORDINACIÓN DE INTERFERENCIA ENTRE CELDAS) EN LTE	20

2.3.2. EICIC EN LTE-ADVANCED	20
2.4. PARÁMETROS PARA DETERMINAR LA COEXISTENCIA ENTRE DOS SISTEMAS ADYACENTES	21
2.4.1. ACLR (RELACIÓN DE POTENCIA DE FUGA DEL CANAL ADYACENTE)	21
2.4.2. ACS (SELECTIVIDAD DEL CANAL ADYACENTE)	22
2.4.3. ACIR (RELACIÓN DE POTENCIA INTERFERENTE DEL CANAL ADYACENTE)	23
2.5. DISPOSICIÓN DE CANALES EN LAS BANDAS DE 900 MHZ Y 1800 MHZ	23
2.5.1. BANDA DE 900 MHZ.....	23
2.5.2. BANDA DE 1800 MHZ.....	23
2.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS LTE900 Y LTE1800	24
2.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS WIMAX	25
3 MEDIDAS	27
3.1. CALCULO DE RELACIÓN DE INTERFERENCIA EN CANALES ADYACENTES (ACIR) DE LTE/WIMAX A GSM Y UMTS.....	27
3.1.1. ACIR DEL ENLACE DESCENDENTE DE UMTS/LTE/WIMAX A GSM/ UMTS.....	27
3.1.2. ACIR DEL ENLACE ASCENDENTE DE UMTS/LTE/WIMAX A GSM/UMTS	28
3.2. CÁLCULOS DE RECHAZO DEL RECEPTOR DE LTE/WIMAX Y LOS VALORES DE ACS PARA LA INTERFERENCIA DE GSM Y UMTS.....	29
3.2.1. BS RECHAZO DEL RECEPTOR DEBIDA AL BLOQUEO POR BANDA ESTRECHA.....	29
3.2.2. RECHAZO DEL RECEPTOR DEL UE DEBIDA AL BLOQUEO POR BANDA ESTRECHA.....	30
3.2.3. RECHAZO DEL RECEPTOR EN BS DEBIDA A LA SELECTIVIDAD DEL CANAL ADYACENTE (ACS)	31
3.2.4. RECHAZO DEL RECEPTOR EN UE DEBIDO A LA SELECTIVIDAD DEL CANAL ADYACENTE (ACS)	31
3.3. RASTERS DEL CANAL PARA GSM/UMTS/LTE/ WIMAX Y SUS IMPLICACIONES EN LA SEPARACIÓN DE LAS PORTADORAS	32
3.3.1. RASTERS DEL CANAL DE GSM, UMTS, LTE Y WIMAX	32
3.3.2. SEPARACIÓN ENTRE PORTADORA GSM Y UMTS/LTE/WIMAX	32
3.3.3. CORTES DEL SISTEMA GSM DEBIDO A INTERFERENCIAS DE LTE/WIMAX	33
3.4. COEXISTENCIA ENTRE LTE Y GSM	36
3.4.1. INTERFERENCIA DE LTE (EUTRA) A GSM	36
3.4.2. INTERFERENCIA DE GSM A LTE (EUTRA)	38
3.4.3. CONCLUSIONES.....	39
3.5. COEXISTENCIA ENTRE LTE (EUTRA) Y UMTS (UTRA)	40
3.5.1. INTERFERENCIA DE LTE (EUTRA) A UMTS	40
3.5.2. INTERFERENCIA DE UMTS A LTE (EUTRA)	41
3.5.3. CONCLUSIONES.....	41
3.6. COEXISTENCIA ENTRE LTE Y SISTEMAS A 900/1800 MHZ	42
3.6.1. RESULTADOS DE SIMULACIONES DE INTERFERENCIAS ENTRE SISTEMAS LTE A 900/1800 MHZ.....	42
3.6.2. SEPARACIÓN ENTRE PORTADORAS DE SISTEMAS LTE (EUTRA) EN LAS BANDAS DE 900/1800 MHZ.....	45
4 SIMULACIONES	47
4.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN (RADIO PLAN).....	49
4.2. PRIMER ESCENARIO: INTERFERENCIA DE LTE SOBRE GSM	50
4.2.1. COBERTURA DE LOS TRANSMISORES	50
4.2.2. INTERFERENCIA CO-CANAL ENTRE LOS SISTEMAS	52



4.2.3.	INTERFERENCIA EN EL CANAL ADYACENTE ENTRE LOS SISTEMAS	53
4.3.	SEGUNDO ESCENARIO: INTERFERENCIA DE LTE SOBRE UMTS	56
4.3.1.	COBERTURA DE LOS TRANSMISORES	56
4.3.2.	INTERFERENCIA CO-CANAL ENTRE LOS SISTEMAS	58
4.3.3.	INTERFERENCIA EN EL CANAL ADYACENTE ENTRE LOS SISTEMAS	59
4.4.	TERCER ESCENARIO: INTERFERENCIA ENTRE SISTEMAS LTE.....	61
4.4.1.	COBERTURA DE LOS TRANSMISORES	61
4.4.2.	INTERFERENCIA CO-CANAL ENTRE LOS SISTEMAS	63
4.4.1.	INTERFERENCIA EN EL CANAL ADYACENTE ENTRE LOS SISTEMAS	64
5	CONCLUSIONES	68
6	BIBLIOGRAFÍA	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.-DISTANCIAS ENTRE CÉLULAS CO-CANALES.	18
FIGURA 2.- EJEMPLO DE ASIGNACIÓN DE RB'S EN LTE APLICANDO ICIC.	20
FIGURA 3.- EJEMPLO DE TRANSMISIÓN DE SUBTRAMAS EN UNA HETNET DE LTE-A USANDO EICIC.	21
FIGURA 4.- DEFINICIÓN DEL ACLR.	22
FIGURA 5.- DEFINICIÓN DEL ACS.	22
FIGURA 6.- BANDA E-GSM 900.	23
FIGURA 7.- BANDA DE GSM 1800.	23
FIGURA 8.-DISPOSICIÓN DE FRECUENCIAS PARA PORTADORA DE GSM Y UMTS.	32
FIGURA 9.-RECEPTOR DE CANAL ADYACENTE GSM (300 kHz).	34
FIGURA 10.-RECEPTOR DE CANAL ADYACENTE GSM (200 kHz).	35
FIGURA 11.-CORTES DEL ENLACE DESCENDENTE GSM.	37
FIGURA 12.-CORTES DEL ENLACE ASCENDENTE GSM.	38
FIGURA 13.- PÉRDIDA DE CAPACIDAD DEL ENLACE DESCENDENTE DE UTRA FDD DEBIDO A INTERFERENCIA DE LTE.	40
FIGURA 14.-PÉRDIDA DE CAPACIDAD DEL ENLACE ASCENDENTE DE UTRA FDD DEBIDO A INTERFERENCIA DE LTE.	41
FIGURA 15.-PROMEDIO DE PÉRDIDAS DEL ENLACE DESCENDENTE DE LTE (E-UTRA).	43
FIGURA 16.-PÉRDIDAS DE RENDIMIENTO EN LTE (EUTRA) DL PARA UN CDF DEL 5%.	43
FIGURA 17.-PROMEDIO DE PÉRDIDA DE RENDIMIENTO DEL ENLACE ASCENDENTE DE LTE (EUTRA).	44
FIGURA 18.-PÉRDIDAS DE RENDIMIENTO EN LTE (EUTRA) UL PARA UN CDF DEL 5%.	44
FIGURA 19.- ESQUEMA DEL SECTOR DE PRUEBAS.	47
FIGURA 20.- SECTOR DE PRUEBA.	48
FIGURA 21.- DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE LA ANTENA.	48
FIGURA 22.- TRANSMISORES Y MALLA RECEPTORA (3M) DEL ESCENARIO 1.	50
FIGURA 23.- COBERTURA DE GSM EN EL ESCENARIO 1.	51
FIGURA 24.- COBERTURA DE LTE EN EL ESCENARIO 1.	51
FIGURA 25.- COBERTURA DE LOS DOS TRANSMISORES EN EL ESCENARIO 1.	51
FIGURA 26.-SIR CO-CANAL ENTRE GSM Y LTE EN EL ESCENARIO 1.	52
FIGURA 27.- SIR DEL CANAL ADYACENTE, GSM (VICTIMA).	53
FIGURA 28.- CALCULO DE LA SIR CON EL MÉTODO DE RAY LAUNCHING.	55
FIGURA 29.- INTERFERENCIA EN EL CANAL DE GSM EN EL ESCENARIO 1.	55
FIGURA 30.-TRANSMISORES Y MALLA RECEPTORA (3M) DEL ESCENARIO 2.	56
FIGURA 31.- COBERTURA DEL Tx1 DE LTE EN EL ESCENARIO 2.	57
FIGURA 32.- COBERTURA DEL Tx2 DE LTE EN EL ESCENARIO 2.	57
FIGURA 33.- COBERTURA DEL Tx DE UMTS EN EL ESCENARIO 2.	57
FIGURA 34.- COBERTURA DE LOS DOS TRANSMISORES EN EL ESCENARIO 2.	57
FIGURA 35.- SIR CO-CANAL ENTRE UMTS Y LTE EN EL ESCENARIO 2.	58
FIGURA 36.-SIR DEL CANAL ADYACENTE, UMTS (VICTIMA).	59
FIGURA 37.- SIR DETALLADO DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL ESCENARIO 2.	60
FIGURA 38.-TRANSMISORES Y MALLA RECEPTORA (3M) DEL ESCENARIO 3.	61
FIGURA 39.- COBERTURA DE LA MACROCELDA LTE EN EL ESCENARIO 3.	62
FIGURA 40.- COBERTURA DE LA PICOCELDA 1 DE LTE EN EL ESCENARIO 3.	62
FIGURA 41.- COBERTURA DE LA PICOCELDA 2 DE LTE EN EL ESCENARIO 3.	62
FIGURA 42.- COBERTURA GLOBAL DEL ESCENARIO 3.	62
FIGURA 43.- SIR CO-CANAL ENTRE PICOCELDA LTE EN EL ESCENARIO 3.	63
FIGURA 44.- INTERFERENCIA CO-CANAL ENTRE TODAS LAS CELDAS EN EL ESCENARIO 3.	64
FIGURA 45.- INTERFERENCIA EN EL CANAL ADYACENTE ENTRE PICOCELDA (VICTIMA) Y MACROCELDA.	64
FIGURA 46.- INTERFERENCIA EN EL CANAL ADYACENTE ENTRE MACROCELDA (VICTIMA) Y PICOCELDA.	65
FIGURA 47.-INTERFERENCIA EN EL CANAL LTE EN LAS PICOCELDA Y EN LA INTERSECCIÓN DE LAS CELDAS EN EL ESCENARIO 3... 66	66

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- PARÁMETROS DEL SISTEMA LTE900/1800	24
TABLA 2.- PARÁMETROS DEL SISTEMA WIMAX900/1800.....	25
TABLA 3.- BS ACLR/200 KHZ CON 300 KHZ DE SEPARACIÓN DE CANAL.....	27
TABLA 4.-BS ACLR/3.84 MHZ A 2.5 MHZ DE SEPARACIÓN DEL CANAL.....	28
TABLA 5.- UE ACLR/200 KHZ A 300 KHZ DE SEPARACIÓN DEL CANAL	28
TABLA 6.-UE ACLR/3.84 MHZ A 2.5 MHZ DE SEPARACIÓN DEL CANAL.	29
TABLA 7.-RECHAZO DEL RECEPTOR DE LA ESTACIÓN BASE A 300 KHZ DEBIDO AL BLOQUEO POR BANDA ESTRECHA.	29
TABLA 8.-RECHAZO DEL RECEPTOR EN LOS TERMINALES DE USUARIO A 300 KHZ DEBIDO AL BLOQUEO POR BANDA ESTRECHA. .	30
TABLA 9.-ACS DEL RECEPTOR BS A 2,5 MHZ DE FRECUENCIA OFFSET Y ACIR.	31
TABLA 10.-ACS DEL RECEPTOR UE A 2,5 MHZ DE FRECUENCIA OFFSET Y ACIR.	32
TABLA 11.- RASTERS DEL CANAL (CHANNEL RASTER).	32
TABLA 12.-POSIBLES SEPARACIÓN ENTRE PORTADORAS GSM Y UMTS/LTE/WIMAX.....	33
TABLA 13.- SEPARACIÓN MÍNIMA ENTRE PORTADORA GSM Y PORTADORA LTE.	39
TABLA 14.-SEPARACIÓN EN FRECUENCIA ENTRE UMTS Y LTE.....	42
TABLA 15.-SEPARACIÓN NOMINAL DE CANAL ENTRE FRECUENCIAS CENTRALES DE PORTADORAS ADYACENTES.	45
TABLA 16.- RESULTADOS DEL ACIR EN EL ESCENARIO 1.	54
TABLA 17.- RESULTADOS DEL ACIR EN EL ESCENARIO 2.	60
TABLA 18.- RESULTADOS DEL ACIR EN EL ESCENARIO 3.	65

RESUMEN

En este proyecto se estudiarán las interferencias en el canal adyacente de los sistemas celulares, ubicados en las bandas de 900 y 1800 MHz. Para esto, se analizarán medidas de interferencia entre LTE y otros sistemas de comunicación celular.

En el primer capítulo, se dará una breve descripción de los principales parámetros empleados en los distintos estándares de comunicaciones móviles, que operan en las bandas de frecuencia de interés.

En el segundo, se van a explicar los distintos tipos de interferencias existentes entre sistemas celulares. También se verán las diferentes técnicas para reducir dichas interferencias, como por ejemplo, la de control de potencia y la de coordinación de interferencia entre celdas. Además, se explicarán los parámetros para determinar la interferencia en el canal adyacente, como son el ACLR, ACS y ACIR. Para finalizar se resumirán las principales características de los sistemas LTE y WiMAX.

En el tercer capítulo, se estudiarán las interferencias que genera principalmente LTE a los otros sistemas celulares, mediante los parámetros que miden la interferencia en el canal adyacente explicados en el capítulo dos. Además, se determinará la separación en frecuencia que debe existir entre los canales para que los sistemas puedan coexistir.

El capítulo cuatro se basa en la simulación de tres escenarios de interferencia entre dichos sistemas. Para esto, se utilizará el *software* de simulación de propagación radio, denominado Radio Plan. Con estas simulaciones se cuantificarán las pérdidas de rendimiento que sufren los sistemas interferidos.

Por último, en el capítulo cinco se resumirán las conclusiones a las que se llegaron después de simular los diferentes escenarios de interferencia.

SUMMARY

In this project an adjacent channel interference study for cellular systems, allocated within 900 MHz and 1800 MHz bands will be performed. For this aim a set of measurements will be analyzed.

In the first chapter, a brief explanation of the main parameters used in different mobile communications standards that operate in the frequency bands of interest, will be given.

In the second chapter, different types of interference between cellular systems will be explained, as well as different techniques to reduce such interference. For example, power control and interference coordination between cells, will be shown. Furthermore, the parameters to determine the adjacent-channel interference, such as the ACLR, ACS and ACIR will be overviewed. Finally, the main features of LTE and WiMAX systems will be summarized.

In the third chapter, the interference generated by the other mainly LTE cellular systems via parameters that measure the adjacent channel interference explained in chapter two will be studied. Also, the frequency separation that must exist between the channels so that the systems can coexist will be determined.

The fourth chapter is based on the simulation of three scenarios of interference between these systems. For this purpose, a radio propagation simulation software package *Radio Plan* will be used. These simulations will quantify performance losses suffered by systems that interfered.

Finally, in chapter five the conclusions about the results of simulations of interference in different scenarios will be presented.

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURA

Abreviación	Explicación
3GPP	3 rd Generation Partnership Project
ACIR	Adjacent Channel Interference Ratio
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio
ACS	Adjacent Channel Selectivity
ARQ	Automatic Repeat reQuest
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CDMA	Code Division Multiple Access
CW	Continuous Wave
DL	Down Link
DSL	Digital subscriber line
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communication
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HetNet	Heterogeneous network
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MS	Mobile Station
NodeB	UMTS Base Station
eNodeB	LTE Base Station
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OOB	Out Of Band
RF	Radio Frequency
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SAE	System Architecture Evolution

SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UL	Up Link
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access

(Página dejada intencionalmente en blanco)

1 INTRODUCCIÓN

1.1. TERCERA GENERACIÓN (3G)

1.1.1. UMTS/WCDMA

UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), es el primer estándar en cumplir todas las especificaciones de la tercera generación, también conocida como 3G, sucesora de la segunda generación basada en GSM, la cual incluye GPRS (*General Packet Radio Service*), y EDGE (*Enhanced Data rates for GSM of Evolution*). Aunque UMTS usa una interfaz totalmente diferente, los elementos principales de la red fueron migrados de GSM para poder cumplir los requerimientos de UMTS, de esta manera la transición de GSM a 3G UMTS no requirió mucha inversión por parte de las operadoras.

UMTS usa WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) para la transmisión radio, por este motivo este sistema es conocido también con el nombre de WCDMA, aparte se le puede llamar 3GSM por ser la migración de GSM a 3G.

1.1.2. 3GPP UMTS Especificaciones y Control

Para lograr manejar un sistema complejo como es UMTS, es necesario desarrollar y mantener un largo historial de documentos y especificaciones. Para el caso de UMTS esto está regido por el grupo conocido como el 3GPP (*The Third Generation Partnership Programme*), este grupo trabaja en cooperación con otras seis organizaciones (ARIB, CCSA, ETSI, ATIS, TTA y TTC).

El objetivo de este grupo es el de estandarizar las técnicas y especificaciones para los sistemas de tercera generación de comunicaciones móviles, basándose en el núcleo de la red GSM y las tecnologías de acceso radio que ellos respaldan como son: UTRA (*Universal Terrestrial Radio Access*) y los modos FDD (*Frequency Division Duplex*) y TDD (*Time Division Duplex*).

Hoy en día este grupo es el encargado de desarrollar los estándares de los nuevos sistemas de comunicaciones móviles como el LTE (*Long Term Evolution*) y el 4G conocido como LTE Advanced.

PARÁMETROS	ESPECIFICACIONES
Tasa de transferencia	2048 kbps -Corto alcance 384 kbps -Exteriores y urbano
Ancho de banda del canal	5 MHz
Esquema de múltiple acceso	CDMA
Esquema dúplex	FDD/TDD

1.1.3. Capacidades de UMTS

UMTS usa WCDMA como estándar de transmisión radio, emplea un ancho de banda de canal de 5 MHz, haciendo uso de este ancho de banda el sistema es capaz de soportar aproximadamente 100 llamadas de voz simultáneamente, o en caso de datos puede manejar una tasa de hasta 2 Mbps en su primer formato. Sin embargo con las mejoras posteriores de HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) y HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) se puede alcanzar hasta 14.4 Mbps.

Una característica que incorpora UMTS es la capacidad de trabajar en los modos FDD y TDD, el primer modo en ser desplegado fue el de FDD donde el enlace ascendente y descendente van en frecuencias diferentes con una separación de 190 MHz, por otro lado en el modo TDD el enlace ascendente y descendente están divididos en el tiempo entre la estación base y los móviles transmitiendo en

intervalos alternados. El modo TDD no ha tenido gran despliegue, pero es un método eficiente cuando los recursos en frecuencia son limitados.

1.1.4. Frecuencias de UMTS

Existen actualmente seis bandas para el uso de UMTS/WCDMA, sin embargo las frecuencias más usadas están alrededor de los 2 GHz, la idea es que la distribución de frecuencias sea un estándar global y así facilitar el roaming para los usuarios.

Dentro de estas bandas la distribución se ha reservado para diferentes usos:

- 1920-1980 MHz para el enlace ascendente y 2110-2170 MHz para el enlace descendente en modo de Duplexación por División de Frecuencia (FDD), ancho de banda de 5 MHz, las operadoras necesitarían de 3 a 4 canales para poder ofrecer una red de alta velocidad y alta capacidad .
- 1900-1920 y 2010-2025 MHz para el modo de Duplexación por división de tiempo (TDD), anchos de banda de 5 MHz y las señales de transmisión y recepción no están separadas en frecuencia.

El número de canal radio frecuencia UARFCN (*UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number*) puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$UARFCN = 5 \times (\text{frecuencia en MHz})$$

1.1.5. Control de potencia en UMTS

Para cualquier sistema CDMA (*Code Division Multiple Access*) es esencial que la estación base reciba a todos los usuarios (UEs) aproximadamente con el mismo nivel de potencia, en caso contrario los usuarios que estén muy alejados de la estación base tendrán menos nivel de señal que los cercanos y podrían no ser recibidos por el NodeB. Para solventar este problema el NodeB indica a los UE cercanos que deben reducir su potencia y a los lejanos que deben aumentarla.

También es importante para los NodeBs controlar su potencia de forma efectiva. Dado que las señales transmitidas por los NodeBs no son completamente ortogonales entre ellas, esto puede ocasionar interferencia, en consecuencia la potencia debe mantenerse al mínimo requerido por los terminales de usuarios. Para lograr este control de potencia existen dos técnicas: *Open Loop* y *Closed Loop*.

- La técnica *Open Loop* es usada en los momentos previos del establecimiento de las comunicaciones entre UEs y NodeBs. La forma de operar consiste en hacer medidas del nivel de señal recibido para posteriormente estimar la potencia que debe ser transmitida. Dado que las frecuencias receptoras y transmisoras son distintas, existirá para cada enlace diferentes pérdidas de trayecto, por lo que este método no será más que una simple estimación.
- El método *Closed Loop*, se emplea una vez los UEs hayan accedido al sistema y estén en comunicación con el NodeBs. Medidas del nivel de señal se llevan a cabo cada *time slot* y como resultado se envía un bit de control de potencia indicando si debe haber regulación o no (1/0), este proceso se realiza para el enlace ascendente y descendente.

1.1.6. CDMA para UMTS

La elección de usar CDMA con la tercera generación de sistemas de telecomunicaciones 3G UMTS surgió por una variedad de razones técnicas. CDMA ofrece ventajas significativas frente al esquema usado en 2G que fue principalmente el TDMA (*Time Division Multiple Access*).

Los principales beneficios de usar CDMA como esquema de acceso múltiple son:

- **Mejora la eficiencia espectral:** El uso de CDMA como tecnología de acceso múltiple, combinado con el uso de una modulación QPSK incorpora una mejora importante en términos de eficiencia espectral. Algunos cálculos estiman que la mejora puede estar cerca de tres veces más en comparación con el sistema previo GSM.
- **El uso del mismo canal de frecuencia en células adyacentes:** Esto es posible gracias a las técnicas de espectro ensanchado, tales como CDMA.
- **Mejora del handover** (traspaso entre células): Con CDMA es posible hacer lo que se denomina "*Soft handover*", el cual permite al UE comunicarse con dos estaciones base al mismo tiempo, esto mejora la fiabilidad del sistema.
- **Mejora en la seguridad:** El uso de técnicas de espectro ensanchado y los múltiples códigos de ensanchamiento por parte de CDMA, permite reducir drásticamente la posibilidad de intersectar y descifrar las comunicaciones, aunque para GSM la seguridad no fue un problema, en los sistemas analógicos con cualquier escáner de comunicaciones de radio se podía escuchar las conversaciones telefónicas.

1.2. 3G UMTS HSPA (HIGH SPEED PACKET ACCESS)

3G HSPA es la combinación de dos tecnologías, una para el enlace descendente y otra para el ascendente, que puede ser aplicada dentro de la ya existente 3G UMTS para dotar al sistema de una mayor velocidad de transferencia.

El 3G UMTS original puede ofrecer como máximo una tasa de 384 kbps, lo cual empezó a ser insuficiente a medida que se desarrollaban nuevos servicios para el móvil, esto ha llevado a la necesidad de desarrollar un nuevo sistema o mejora del actual que permita suplir estas demandas, y a esta tecnología se le llamo HSPA (Acceso de paquetes a alta velocidad).

1.2.1. Characteristics de HSPA

El sistema proporciona una mejora sobre 3G UMTS, aportando tasas de transferencia que eran imposibles de alcanzar en el del sistema previo, así como una mayor eficiencia espectral.

Algunas de las especificaciones de rendimiento dadas por la 3GPP se pueden ver en la tabla siguiente.

TASA BINARIA 3G HSPA			
3GPP Release	Tecnología	Enlace descendente (Mbps)	Enlace ascendente (Mbps)
Rel 5	HSDPA	14,4	0,384
Rel 6	HSUPA	14,4	5,7
Rel 7	Capacidad de datos x2 capacidad de voz x2	28	11
Rel 8	Multiportadora	42	11
Rel 9	Multiportadora 10 MHz, 2x2 MIMO UL, 16 QAM	84	23
Rel 10	20 MHz 2x2 MIMO	168	23
Rel 11	40 MHz 2x2 / 4x4 MIMO, 64-QAM	336-672	70

1.2.2. Ventajas de HSPA

El sistema celular UMTS descrito por la 3GPP en la “Release 99” está orientado más hacia la conmutación de circuitos y no provee una adaptación completa a la conmutación de paquetes.

HSPA proporciona un gran número de ventajas que le permiten al nuevo servicio proveer un mejor rendimiento a los usuarios. A parte de la alta velocidad de transferencia, HSPA ofrece las siguientes ventajas:

- Uso de modulación de orden mayor.
- Intervalos de tiempos de transmisión más cortos.
- Uso de canales de transmisión compartidos.
- Uso adaptativo del enlace.
- Uso de Hybrid ARQ (*Automatic Repeat Request*) en los NodeB

La implementación de la tecnología 3G HSPA, trajo una reducción del costo por bit y un aumento de la capacidad del sistema, otro atractivo para las operadoras fue que este sistema podía ser implementado con actualización de software.

1.2.3. Características del 3G HSDPA

El 3G HSDPA *High Speed Downlink Packet Access* (Acceso de paquetes a alta velocidad en el enlace descendente) es una mejora al sistema celular 3G UMTS que proporciona una mayor velocidad en descarga de datos, debido a que el mayor tráfico de datos se concentra en el enlace descendente, la prioridad era implementar esta mejora tan pronto como fuera posible, la actualización para el enlace ascendente llegó un tiempo después.

La mejora a 3G HSDPA incluye varios cambios que se basan en el estándar del 3GPP UMTS, algunos de estos cambios son válidos para el HSUPA, pero otros son únicos para el enlace descendente debido a que las características requeridas por cada enlace son diferentes.

- **Modulación:** Una de las características de HSDPA es el uso de una modulación más eficiente (16-QAM) que la usada en WCDMA (QPSK), esta modulación es menos resistente al ruido, pero transporta mayor cantidad de bits, para poder transmitir con esta modulación en vez de la QPSK hay que determinar las condiciones del canal, control de potencia e información de la calidad de servicio (QoS).
- **HARQ rápido:** el HARQ rápido (*Fast Hybrid Automatic Repeat Request*) ha sido implementado mediante operaciones multii-códigos, y evita la necesidad de reenviar todos los paquetes que contengan bits erróneos en concreto, ya que almacena parte de los paquetes. De esta manera los usuarios que se encuentren lejos o cerca de la estación base se van a poder beneficiar de una mejor tasa de transferencia.
- **Programador mejorado:** Mayores avances se han hecho en el área del programador de tráfico, dotando a la estación base de una mayor “inteligencia”, esto permite que la mayoría de los recursos se asignen a un

usuario específico por un periodo corto de tiempo, tan pronto como las condiciones de canal sean favorables.

- **Canales adicionales:** Para que el sistema sea capaz de transportar datos de la forma que se requiere, es necesario añadir nuevos canales.

1.2.4. Rendimiento del HSDPA

Al usar el esquema HSDPA es posible lograr una tasa de transferencia pico de 10 Mbps, dentro de los 5 MHz de ancho de banda que ofrece el 3G UMTS. El nuevo esquema trae varios beneficios dentro los cuales está: la mejora en general de la capacidad de la red de datos, mejoras la eficiencia espectral y permite lograr un bajo costo por bit. Los usuarios podrán experimentar altas velocidad así como también tiempos de respuesta cortos y mejor disponibilidad de servicio. Sin embargo estas mejoras obligan a los nuevos dispositivos móviles a poseer procesadores más rápidos y mayor capacidad de memoria.

1.2.5. Características del 3G HSUPA

Acceso a paquetes en alta velocidad en el enlace ascendente es el significado de HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), es la tecnología equivalente al HSDPA pero aplicada a las comunicaciones entre el terminal móvil y el NodeB (estación base UMTS). HSUPA utiliza muchas tecnologías similares al HSDPA, pero debido a las diferencias que exigen los diferentes enlaces estas tecnologías no son idénticas.

HSUPA dota a los terminales de usuarios con una gran capacidad en el enlace ascendente, aunque las tasas de datos de subida son normalmente bajas, al introducir la posibilidad de enviar emails y compartir contenido por la red de datos, el sistema 3G original se quedaba corto de prestaciones, sin embargo con la aplicación del HSUPA estos servicios pueden ser aprovechados de mejor forma.

3G HSUPA trae una mejora de rendimiento, mediante la implementación de nuevas características sobre el sistema existente 3G UMTS, dentro de las cuales están:

- **Incremento de la tasa de datos:** El uso de HSUPA permite un incremento significativo de la capacidad del enlace de subida, y consigue una velocidad pico de hasta 5,74 Mbps.
- **Bajas latencias:** El sistema introduce un TTI (*Transmission Time Interval*) de 2 ms, aunque el TTI original de 10 ms sigue siendo usado.

- **ARQ Híbrida:** Para lograr una mejora en el rendimiento, el ARQ híbrido usado en el HSDPA es también usado en el enlace ascendente.
- **Programador de paquetes rápido:** Para reducir la latencia, el programador de paquetes rápido es usado en el HSUPA.

1.2.6. Evolved HSPA / HSPA+

Evolved HSPA mejor conocido como HSPA+ es una mejora del sistema HSPA, la cual permite conseguir una mayor velocidad de transmisión que el sistema anterior, otros factores como la latencia y el backhaul también fueron tratados en esta actualización.

La necesidad de HSPA+ surge debido al creciente número de usuarios que utilizan la red de datos, y desean una conexión más rápida comparada a las líneas de banda ancha fijas, no solo los teléfonos móviles se conectan con esta red, sino que se ofrece el servicio de 3G portable que permite a cualquier ordenador conectarse a la red celular para tener acceso a internet.

Algunas de las mejoras que introduce el HSPA+ son:

- MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*)
- Modulación de orden mayor
- Conectividad continua de paquetes
- Mejoras en el protocolo de capa 2

1.3. 3G LTE (LONG TERM EVOLUTION)

LTE *Long Term Evolution* es el sucesor del 3G UMTS y HSPA, actualmente está siendo implementado por la operadora de telefonía móvil, esta nueva tecnología no se considera 4G, es conocida como 3,99G con algunas mejoras se llega al LET-A que es donde empieza el 4G.

Ha habido un rápido incremento en el uso de datos a través del servicio celular, este incremento seguirá aumentando a largo plazo, a este fenómeno se le ha denominado “Explosión o saturación de datos”, para lidiar con este efecto y poder ofrecer mayor capacidad, velocidad y baja latencia se desarrolló la tecnología LTE.

1.3.1. Evolución de 3G LTE

Existen grandes cambios entre LTE y su predecesor de 3G, sin embargo, es visto como una evolución del estándar UMTS / 3GPP, aunque usa una interfaz de radio diferente, OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) / SC-FDMA

(*Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*) en vez de CDMA, hay muchas similitudes con la arquitecturas previa de 3G lo que permite un margen de reutilización.

LTE puede ser visto como una mejora en general del sistema celular 3G, el cual incluye una serie de nuevos servicios y funcionalidades, el principal objetivo como en cualquier evolución tecnológica es dotar al sistema de un mejor rendimiento global, en la siguiente tabla se muestra el rendimiento de los primeros *Release* de LTE en comparación con los sistemas previos.

	WCDMA (UMTS)	HSPA HSDPA / HSUPA	HSPA+	LTE
Velocidad máx. de descarga (bps)	384 k	14 M	28 M	100M
Velocidad máx. de subida (bps)	128 k	5.7 M	11 M	50 M
Latencia ida y vuelta aprox.	150 ms	100 ms	50ms (máx.)	~10 ms
3GPP Releases	Rel 99/4	Rel 5 / 6	Rel 7	Rel 8
Año de despliegue	2003 / 4	2005 / 6 HSDPA 2007 / 8 HSUPA	2008 / 9	2009 / 10
Método de acceso	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA / SC- FDMA

Además de esto, la red LTE está basado en su totalidad en IP, soporta tanto IPv4 como IPv6.

1.3.2. Resumen de las especificaciones

Las características del enlace descendente y el ascendente son diferentes en LTE, y esto genera diferentes especificaciones y rendimientos entre ellos, en la siguiente tabla se recoge las especificaciones básicas de LTE.

En esta tabla se puede observar las principales características de LTE, estas cumplen los requisitos de la industria de alta velocidad de paquetes, así como una reducción de latencia, el cual es un factor importante para ofrecer servicios como VoIP (Voz sobre IP) y uso interactivo de datos, aparte ofrece una gran mejora en la eficiencia espectral.

PARÁMETROS	DETALLES
Velocidad pico de descarga 64QAM (Mbps)	100 (SISO), 172 (2x2 MIMO), 326 (4x4 MIMO)
Velocidad pico de subida (Mbps)	50 (QPSK), 57 (16QAM), 86 (64QAM)
Tipo de datos	Voz y datos se manejan por conmutación de paquetes
Ancho de banda del canal (MHz)	1.4, 3, 5, 10, 15, 20
Esquema dúplex	FDD y TDD
Latencia	Paso de Idle a Activo menos de 100ms, envío de paquetes pequeños 10ms
Eficiencia espectral	Downlink: 3 - 4 veces mayor a HSDPA Uplink: 2 - 3 veces mayor a HSUPA
Método de acceso	OFDMA (Descarga) SC-FDMA (Subida)
Tipo de modulación soportada	QPSK, 16QAM, 64QAM

1.3.3. Principales tecnologías en LTE

Algunas de tecnologías que distinguen a LTE de los sistemas celulares previos son los siguientes:

- **OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales):** La tecnología OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) ha sido incorporada dentro de LTE debido a que permite transmitir grandes anchos de banda de forma eficiente, y proporciona resistencia frente a desvanecimientos e interferencias. El método de acceso para el enlace descendente es OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales); mientras que el SC-FDMA es usado para el enlace ascendente, esta diferencia se debe a que SC-FDMA ofrece un promedio de potencia menor y constante, esto permite a los amplificadores RF trabajar más eficientemente y disminuir el consumo eléctrico del dispositivo de mano (factor importante en el ahorro de batería).
- **MIMO (Multiple Input Multiple Output):** Uno de los principales problemas que los sistemas de telecomunicaciones anteriores han encontrado, se debe a las múltiples señales que se generan por reflexiones en el trayecto. Mediante el uso de MIMO, estas rutas adicionales se pueden utilizar como una ventaja, siendo capaces de aumentar el rendimiento del sistema.

Cuando se usa MIMO es necesario trabajar con múltiples antenas y diferenciar cada trayecto que se envía por cada una de ellas, las matrices de antenas que se pueden usar en LTE son 2x2, 4x2 o 4x4.

- **SAE (System Architecture Evolution):** Con velocidades de transmisión tan rápidas y baja latencia es necesario evolucionar la arquitectura para permitir que se logren las mejoras en el rendimiento. Uno de los cambios es el traspaso de un número de funciones que antes hacía el núcleo de la red y ahora se movió a la periferia de la red, esto proporciona un funcionamiento de la arquitectura más “plano”, esto permite que se reduzca la latencia y que los datos puedan enrutarse de forma más directa a su destino.

1.3.4. Anchos de banda de canal

Uno de los parámetros fundamentales asociados con el uso de OFDM dentro de LTE es la elección del ancho de banda. El ancho de banda disponible afecta una serie de decisiones, dentro de la cuales está el número de portadoras que se van a ubicar en la señal OFDM y la longitud de los símbolos que va a tener cada elemento.

LTE define un número de anchos de banda de canal dentro de los cuales tenemos:

1. 1,4 MHz
2. 3 MHz
3. 5 MHz
4. 10 MHz
5. 15 MHz
6. 20 MHz

Adema de esto las subportadoras están espaciadas 15 kHz una de otras, esto da una relación de símbolo de $1/15\text{kHz} = 66,7 \mu\text{s}$. Cada subportadora es capaz de manejar una tasa máxima de 15 ksps (kilo símbolo por segundo), esto permite transportar 18 Msps en un ancho de banda de 20 MHz, el cual usando una modulación de 64QAM puede llegar hasta los 108 Mbps.

La tasa binaria efectiva depende de varios factores, uno de ellos es el ECR (Tasa Efectiva de Codificación), dependiendo de las condiciones del canal, se puede usar menor o mayor redundancia en la codificación.

1.3.5. Ventajas y desventajas de LTE TDD y LTE FDD

Existen ciertas ventajas y desventajas entre TDD y FDD que son de particular interés para las operadoras de telecomunicaciones, estas se resumen en la siguiente tabla.

PARÁMETROS	LTE-TDD	LTE-FDD
Espectro emparejado	No necesita espectro emparejado ya que la transmisión y recepción ocurren en el mismo canal	Requiere de espectro emparejado con suficiente separación en frecuencia para permitir transmisión y recepción simultáneamente
Costo del hardware	Bajo costo ya que no requiere un diplexor para aislar la transmisión de la recepción.	Se necesita un diplexor y esto aumenta los costos.
Reciprocidad del canal	El canal de propagación es el mismo para ambas direcciones, lo que permite usar los mismos parámetros en Tx y Rx.	Las características del canal son diferentes debidas al uso de frecuencias distintas.
Asimetría DL / UL	Es posible cambiar de forma dinámica la capacidad del DL y UL para satisfacer la demanda.	La capacidad del DL / UL está determinada por la asignación de frecuencia propuesta por las autoridades, por esta razón no es posible ajustar dinámicamente la capacidad de los enlaces.
Banda de guarda / Periodo de guarda	Es necesario un periodo de guarda para que el UL y DL no se interfieran. Periodos de guarda más largos limitan la capacidad del enlace, pero son necesarios para transmitir a largas distancias.	Se requiere de una banda de guarda para proporcionar suficiente aislamiento entre el DL y UL, una banda de guarda mayor no limita la capacidad de los enlaces.
Trasmisión discontinua	La transmisión discontinua es necesaria para permitir ambas transmisiones (UP y DL), esto puede degradar el rendimiento de los circuitos RF (ej. Amplificadores RF).	Se usa transmisión continua.
Interferencia cruzada	La estación base debe sincronizarse con respecto a los tiempos de transmisión del UP y DL, en caso de que estaciones bases vecinas asignen y compartan un mismo canal puede generar interferencia entre celdas.	No aplica.

1.3.6. Fundamentos de MIMO en LTE

El concepto fundamental de MIMO, es usar la propagación multi-trayecto que está presente en toda comunicación terrestre como una ventaja, en lugar de interferencia.

MIMO está siendo usado en muchas tecnologías de alta velocidad de transferencia incluyendo Wi-Fi, y otras tecnologías inalámbricas y celulares para proporcionar de una mayor eficiencia. MIMO esencialmente usa múltiples antenas en el transmisor y el receptor para aprovechar el efecto multi-trayecto que existe en la comunicación.

La señal entre un transmisor y un receptor puede tomar varios caminos, incluso cambiado la distribución espacial de las antenas una distancia corta, estos caminos cambian. La variedad de trayectos ocurre debido a los múltiples objetos que están entre el transmisor y receptor, los cuales generan reflexiones y difracciones al entrar en contacto con la portadora, esta variedad de caminos se aprovecha para aumentar la robustez de la comunicación, mejorando la relación señal a ruido, o para aumentar la capacidad del enlace.

Los dos formatos principales de MIMO son:

- **Diversidad espacial:** La diversidad espacial normalmente se refiere a la diversidad del transmisor y receptor. Esta metodología se usa para mejorar la relación señal a ruido, y se caracterizan por aumentar la fiabilidad del sistema contra los distintos desvanecimientos.
- **Multiplexación espacial:** Esta forma de MIMO se usa para aumentar la capacidad al enlace usando los múltiples trayectos como canales adicionales de tráfico, de esta forma se incrementa el caudal de transmisión de datos y mejora la capacidad del sistema.

1.4. WIMAX ESTANDAR IEEE 802.16

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) es una tecnología inalámbrica de comunicaciones en banda ancha, que ofrece alta velocidad de transmisión en grandes áreas, y se recoge en el estándar 802.16 de la IEEE.

1.4.1. Versiones del IEEE 802.16

Desde su concepción inicial se han ido desarrollando nuevas aplicaciones para WiMAX, como resultado existen dos versiones de esta tecnología, que son:

- **802.16d – Reemplazo del DSL:** Es conocido también como 802.16-2004 y es una alternativa inalámbrica al servicio de banda ancha fija. El 802.16d puede ofrecer tasa de datos de hasta 75 Mbps, esto lo hace ideal como reemplazo servicios DSL fijo.
- **802.16e – WiMAX Móvil:** Aunque el estándar 802.16 fue pensado en sus orígenes para servicio de banda ancha fijo, la necesidad de las personas en tener un servicio de datos de alta velocidad que sea portable y por un costo menor a la telefonía celular, llevó al desarrollo de la versión 802.16e también conocida como 802.16-2005, actualmente permite a muchos usuarios conectarse a una celda WiMAX desde diferentes ubicaciones, el radio de estas celdas son entre 2 a 4 km.

1.4.2. Características de WiMAX

WiMAX es considerado uno de los principales competidores de LTE en ofrecer un servicio móvil de alta velocidad de transferencia, el servicio se ofrece a través de una distribución de células, esto hace que muchas de las características sean similares entre WiMAX y LTE, algunas de éstas se muestran a continuación.

- TDD, FDD y operaciones *half-duplex* (H-FDD).
- TDMA con tamaño de trama variable (2-20 ms).
- OFDM con una longitud de prefijo configurable.
- Un amplio rango de ancho de banda (1,25 - 28 MHz).
- Múltiples esquemas de codificación y modulación: QPSK, 16QAM, 64QAM combinados con códigos convolucionales, turbo códigos, etc.
- *Hybrid* ARQ
- MIMO.

1.4.3. MIMO en WiMAX

La versión 802.16e al igual que LTE ofrecen la posibilidad de usar un esquema MIMO en la transmisión y recepción de señales, esto aporta un gran beneficios en términos de cobertura, consumo de potencia, reutilización de frecuencias y eficiencia espectral.

WiMAX a través del uso de MIMO (2x2) en el enlace descendente puede conseguir altas velocidad de transmisión, en el caso del enlace ascendente puede usar el esquema “enlace compartido MIMO”, en donde dos usuarios pueden transmitir

con una sola antenas en el mismo slot, y la estación base lo recibe de forma multiplexada con dos antenas, como si fuera un solo usuario usando MIMO.

1.4.4. Codificación y modulación adaptativa en WiMAX

En WiMAX la codificación y la modulación son adaptativas, depende de las condiciones del enlace. La modulación y la codificación pueden variar por cada ráfaga transmitida y para determinar cuál usar en cada caso, es necesario saber las condiciones del canal previamente, estas condiciones se pueden estimar analizando la calidad de la señal recibida.

PARÁMETROS	ENLACE DESCENDENTE	ENLACE ASCENDENTE
Modulación	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM; BPSK opcional for OFDMA	BPSK, QPSK, 16 QAM; 64 QAM opcional
Codificación	Relación del código convolucional 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Opcional: relación de los turbo códigos 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; relación de códigos de repetición 1/2, 1/3, 1/6, LDPC.	Relación del código convolucional 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 Opcional: relación de los turbo códigos 1/2, 2/3, 3/4, 5/6; relación de códigos de repetición 1/2, 1/3, 1/6, LDPC

(Página dejada intencionalmente en blanco)

2 INTERFERENCIAS

La interferencia es el principal factor que limita el desarrollo de los sistemas celulares. Las interferencias pueden producirse, bien por otros equipos móviles dentro de la misma celda, o por cualquier otro sistema que de forma inadvertida introduce potencia dentro de la misma banda de frecuencia. Las interferencias son mayores en las áreas urbanas, debido a la gran densidad de transmisión de radio frecuencia y al gran número de estaciones base y equipos móviles.

Los dos tipos principales de interferencias son: Interferencias co-canal y las interferencias entre canales adyacentes. Aunque las señales interferentes se generan normalmente dentro del sistema celular, estas son difíciles de controlar debido a los efectos aleatorios de propagación, sin embargo las peores interferencias son aquellas producidas por otros usuarios fuera de la banda (ej. otros sistemas celulares), que interfieren a causa de los productos de intermodulación y a un mal filtrado de la señal transmitida. En la práctica, las principales fuentes de interferencias son debido a la limitada distribución en el espectro radioeléctrico, que obliga a las distintas operadoras a transmitir muy cerca una de la otra (en frecuencia) para poder maximizar el uso de la banda.

2.1. TIPOS DE INTERFERENCIAS

2.1.1. Interferencia co-canal y Capacidad del Sistema

La reutilización de frecuencias implica que en un área de cobertura dada, haya varias celdas que usen el mismo conjunto de frecuencias, estas celdas son llamadas celdas co-canales, y la interferencia entre estas celdas se le llama interferencia co-canal. Al contrario que el ruido térmico, el cual se puede superar incrementando la relación señal ruido ("*Signal to Noise Ratio*" ó SNR), la interferencia co-canal no se puede combatir simplemente incrementando la potencia de un transmisor, esto es debido a que un incremento en la potencia de transmisión de una celda, incrementa la interferencia hacia las celdas co-canales vecinas. Para reducir la interferencia co-canal las celdas deben estar físicamente separadas por una distancia mínima que proporcione suficiente aislamiento.

En un sistema celular, cuando el tamaño de cada celda es aproximadamente el mismo, se puede decir que la interferencia co-canal es independiente de la potencia transmitida y se convierte en una función del radio de la celda (R), y de la distancia al centro de la celda co-canal más próxima (D). Incrementando la relación D/R , se incrementa la separación entre celdas co-canales relativa a la distancia de cobertura. El parámetro Q , llamado factor de reutilización co-canal, está relacionado con el tamaño del *cluster* J . Para una geometría hexagonal sería:

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3J}$$

Un valor pequeño de Q proporciona una mayor capacidad dado que el tamaño del *cluster* J es pequeño, mientras que un valor grande mejora la calidad, debido a que disminuye la interferencia co-canal. Se debe llegar a un compromiso entre estos dos objetivos a la hora del diseño.

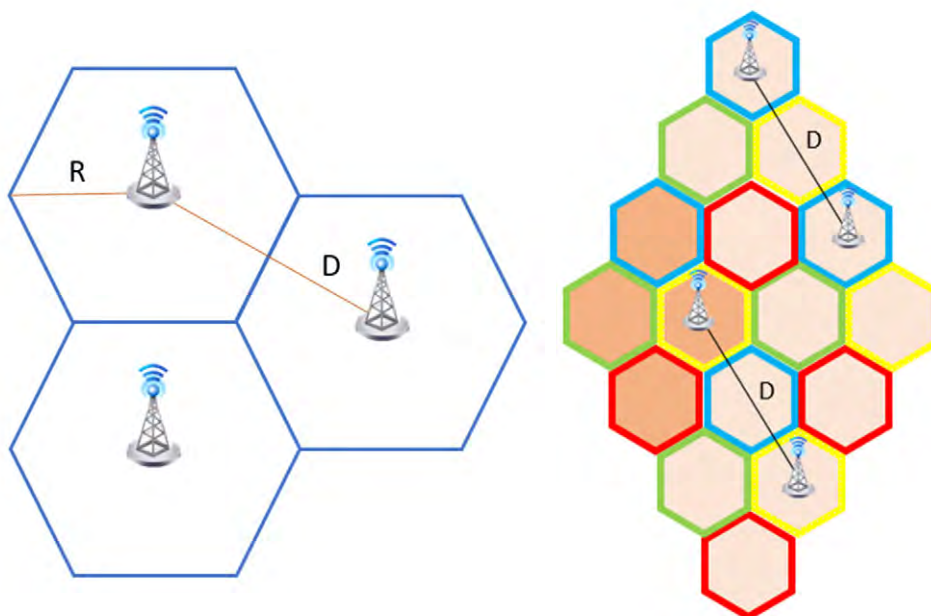


Figura 1.-Distancias entre células co-canales.

Tomemos i_0 como el número de celdas con interferencia co-canal. Entonces la relación Señal - Interferencia ("*Signal to Interference Ratio*" ó SIR) de un receptor móvil puede ser expresada como:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i}$$

Donde C es la potencia de la señal deseada, e I_i es la potencia de la interferencia causada por la i -ésima estación base en una celda co-canal. Si se conocen los

niveles de señal de las celdas co-canales, se puede calcular la SIR usando la fórmula anterior.

Existe una relación entre la C/I y el tamaño del *cluster* J:

$$\frac{C}{I} = \frac{(\sqrt{3}J)^n}{i_0}$$

Donde el exponente n nos indica las pérdidas producidas por la propagación y suele tomar valores típicos entre 2 y 4 dependiendo del entorno en el que estemos (4 para áreas urbanas). Según pruebas realizadas experimentalmente, se encuentra que se proporciona una suficiente calidad de voz con una C/I de unos 18 dB, con lo que se obtiene un valor de J de 6.49 asumiendo un exponente de pérdidas de 4, con lo que un valor típico para J sería de 7.

2.1.2. Interferencia entre canales adyacentes

Las interferencias entre canales adyacentes son procedentes de señales que son adyacentes en frecuencia a la señal deseada. Estas interferencias se pueden producir por imperfecciones en los filtros de los receptores y transmisores, que permiten a las frecuencias cercanas interferir dentro de la banda pasante. Esta interferencia puede ocasionar grandes problemas en caso de que un usuario este transmitiendo en un rango muy próximo al canal de recepción de otro móvil, o en su defecto dos móviles que estén transmitiendo en canales cercanos, ya que la estación base puede tener dificultad para discriminar al usuario interferente del deseado.

Este tipo de interferencias se pueden minimizar filtrando cuidadosamente, y con una correcta asignación de frecuencias. Dado que cada celda maneja sólo un conjunto del total de canales, los canales a asignar en cada celda no deben estar próximos en frecuencias.

2.2. CONTROL DE POTENCIA PARA REDUCIR LAS INTERFERENCIAS

En los sistemas celulares, los niveles de potencia transmitida por cada unidad móvil, están bajo un control de las estaciones base. Esto se hace para asegurar que cada móvil transmite la potencia más baja posible. El control de potencia no sólo hace que dure más la batería, sino que también reduce la C/I.

2.3. ICIC (COORDINACIÓN DE INTERFERENCIA ENTRE CELDAS)

Con el continuo despliegue de LTE, cada vez más operadores quieren estar actualizados con lo último en sistemas de telecomunicaciones, pero las limitaciones en cuanto a espectro sigue siendo un problema. Las redes heterogenias multicapas y las pico-células siguen siendo la clave para aumentar la eficiencia espectral, cuando las operadoras consiguen aplicar estos métodos, la interferencia entre celdas es el factor que limita la posibilidad del sistemas en satisfacer las necesidades de la mayoría de usuarios, por este motivo los investigadores están centrados en trabajar sobre la coordinación de interferencias entre celdas (ICIC), para establecer los estándares de las próximas generaciones de telefonía móvil e incluso sobre la actual LTE (3.9G).

2.3.1. ICIC (Coordinación de interferencia entre celdas) en LTE

En la *Release 8* de la 3GPP este método es opcional y se introduce para disminuir la interferencia entre macroceldas. Esto se logra disminuyendo la potencia en los subcanales que solo se pueden recibir cerca de la estación base, y aumentando la potencia en aquellos subcanales que se destinan para los usuarios que estén en el borde de la celda, estos subcanales o RBs son diferentes a los asignados por las estaciones vecinas.

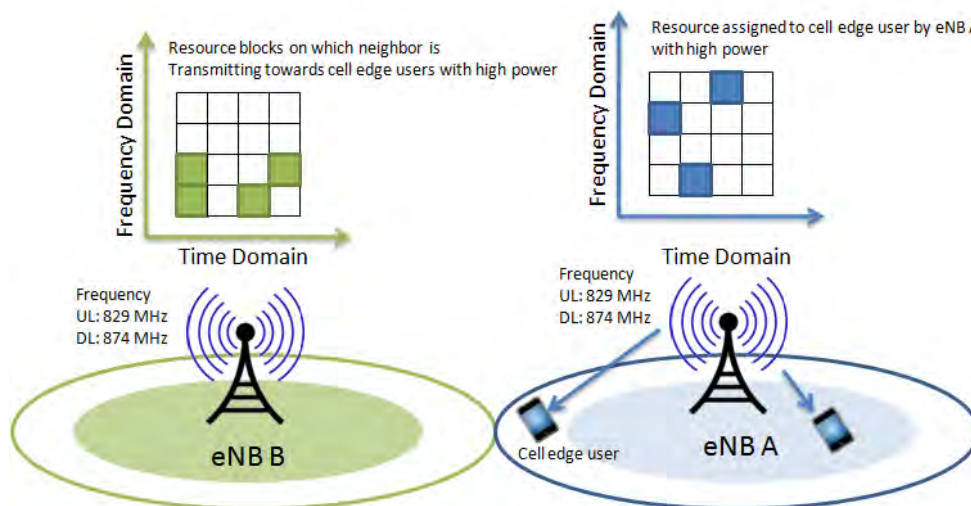


Figura 2.- Ejemplo de asignación de RBs en LTE aplicando ICIC.

2.3.2. eICIC en LTE-Advanced

El eICIC se especifica en el *Release 10* de la 3GPP y es parte de la solución para la interferencia en las redes heterogenias (HetNet), donde las macroceldas están complementadas con picoceldas en su interior, mientras las macroceldas transmiten a largas distancias y con alta potencia, las picoceldas transmiten con poca potencia y cubren áreas más cortas. Para mitigar la interferencia entre las

macrocelda y la picocelda, la eICIC coordina en el dominio del tiempo las subtramas vacías (ABS) que transmite la estación base de la macrocelda, para que las picoceldas puedan enviar datos durante estos periodos, todas las pico celdas pueden usar estos periodos de subtramas vacías para enviar al mismo tiempo sin que haya interferencia.

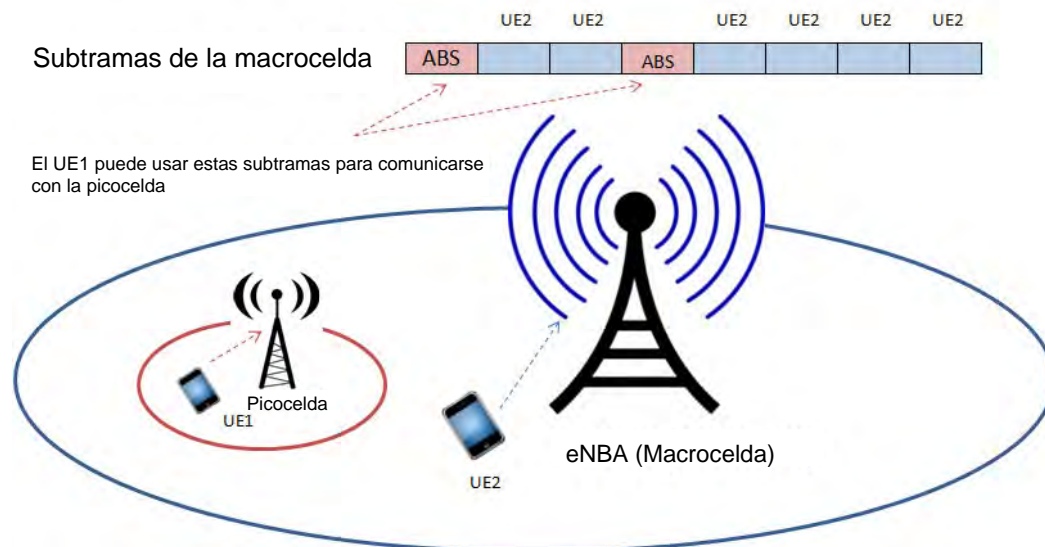


Figura 3.- Ejemplo de transmisión de subtramas en una HetNet de LTE-A usando eICIC.

2.4. PARÁMETROS PARA DETERMINAR LA COEXISTENCIA ENTRE DOS SISTEMAS ADYACENTES

A la hora de determinar si dos sistemas pueden coexistir cuando ambos transmiten en bandas de frecuencia muy cercanas, es de gran utilidad medir los parámetros ACLR (*Adjacent Channel Leakage Ratio*), ACS (*Adjacent Channel selectivity*) y el ACIR (*Adjacent Channel Interference Ratio*).

2.4.1. ACLR (Relación de potencia de fuga del canal adyacente)

El ACLR se define como la relación entre la potencia transmitida dentro de un ancho de banda asignado, y la potencia de las emisiones no deseadas transmitida en el canal adyacente, este parámetro mide la cantidad de potencia que se escapa de la banda asignada de transmisión, y entra en el canal adyacente.

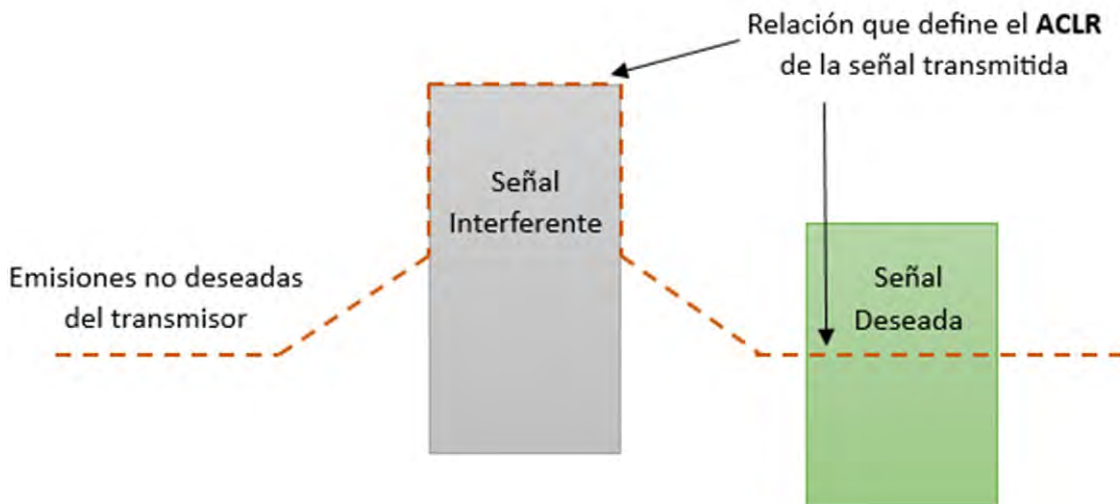


Figura 4.- Definición del ACLR.

2.4.2. ACS (Selectividad del canal adyacente)

El ACS es la capacidad que tiene el receptor para suprimir las señales que se encuentran en los canales adyacentes, este parámetro está definido por los filtros del receptor, y es la relación entre la cota superior del filtro en la banda deseada, y la cota inferior que atenúa el canal adyacente. Estos valores dependen de que canal adyacente se esté midiendo, se suelen especificar valores hasta ACS_3 (tercer canal adyacente).

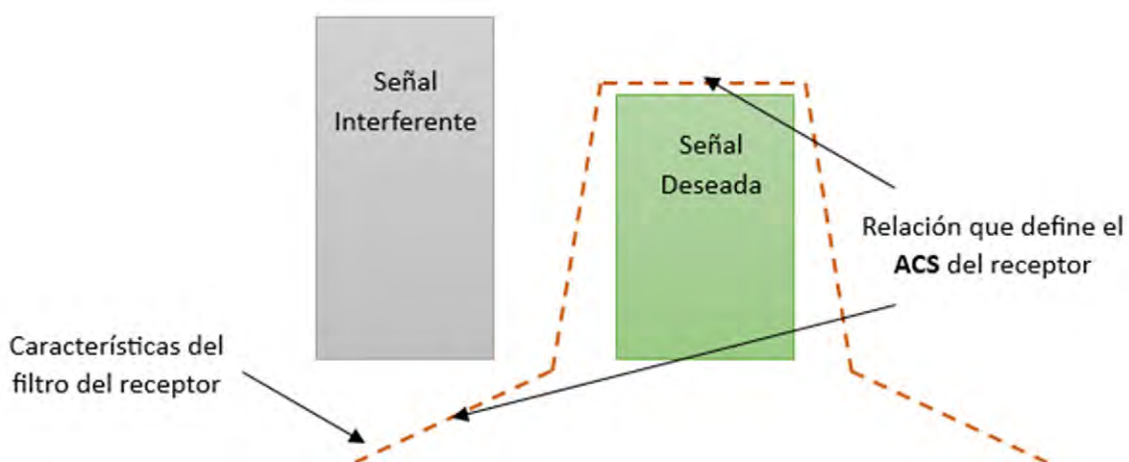


Figura 5.- Definición del ACS.

2.4.3. ACIR (Relación de potencia interferente del canal adyacente)

El resultado de aplicar el ACLR y el ACS de una señal interferente y una deseada, es la potencia total que se cuela en el canal adyacente e interfiere la señal deseada, a esta relación se le conoce como ACIR. Esta relación se puede calcular como la potencia total transmitida por la señal interferente menos la potencia que se logra colar en el canal deseado en decibelios, o bien en unidades naturales con la siguiente ecuación:

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}}$$

2.5. DISPOSICIÓN DE CANALES EN LAS BANDAS DE 900 MHZ Y 1800 MHZ

2.5.1. Banda de 900 MHz

- 2x25 MHz para la banda estándar GSM-900, P-GSM:
 - Enlace ascendente (UL) 890 – 915 MHz
 - Enlace descendente (DL) 935 – 960 MHz
- Otros 2x10 MHz se añaden como parte del GSM-900 Extendido, E-GSM:
 - Enlace ascendente (UL) 880 – 915 MHz
 - Enlace descendente (DL) 925 – 960 MHz

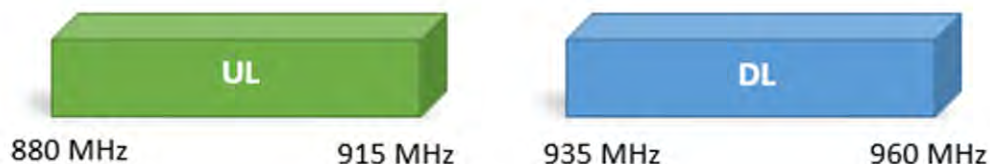


Figura 6.- Banda E-GSM 900.

2.5.2. Banda de 1800 MHz

- 2x75 MHz para toda la banda de GSM-1800
 - Enlace ascendente (UL) 1710 – 1785 MHz
 - Enlace descendente (DL) 1805 – 1880 MHz



Figura 7.- Banda de GSM 1800.

2.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS LTE900 Y LTE1800

Los parámetros principales del sistema LTE900 y LTE1800 se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 1.- Parámetros del sistema LTE900/1800

	LTE900		LTE1800	
Downlink band (MHz)	925 – 960		1805-1880	
Uplink band (MHz)	880 – 915		1710 – 1785	
Carrier separation (MHz)/ carrier bandwidth/ resource blocks	1.4/1.08/6 3/2.7/15 5/4.5/25 10/9/50 15/13.5/75 20/18/100		1.4/1.08/6 3/2.7/15 5/4.5/25 10/9/50 15/13.5/75 20/18/100	
Channel raster (kHz)	100		100	
	BS	UE	BS	UE
Tx Power (Maximum) (dBm)	43	23	43	23
Antenna gain (dBi)	18 (rural) 15 (urban)	0	18	0
Feeder loss (dB)	3	0	3	0
Antenna height (m)	45 (Rural) 30 (Urban)	1.5	45 (Rural) 30 (Urban)	1.5
Antenna down-tilt (°)	3 (Urban) 3 (Rural)	-	3 (Urban) 3 (Rural)	-
BS-UE MCL (dB)	80 (Rural) 70 Urban)	-	80 (Rural) 70 (Urban)	-
ACLR_1 (First adjacent channel) (dB)	45 (LTE & UMTS channel BWs)	30 (LTE channel BWs) 33 (3.84 MHz)	45 (LTE & UMTS channel BWs)	30 (LTE channel BWs) 33 (3.84 MHz)
ACLR_2 (Second adjacent channel) (dB)	45 dB (LTE & UMTS channel BWs)	36 (LTE channel BWs) 36 (3.84 MHz)	45 dB (LTE & UMTS channel BWs)	36 (LTE channel BWs) 36 (3.84 MHz)

	LTE900		LTE1800	
	BS	UE	BS	UE
Receiver Bandwidth (MHz)	1.08	1.08	1.08	1.08
	2.7	2.7	2.7	2.7
	4.5	4.5	4.5	4.5
	9	9	9	9
	13.5	13.5	13.5	13.5
	18	18	18	18
Receiver Temperature (kBT) (dBm)	-113.6	-113.6	-113.6	-113.6
	-109.7	-109.7	-109.7	-109.7
	-107.4	-107.4	-107.4	-107.4
	-104.4	-104.4	-104.4	-104.4
	-102.7	-102.7	-102.7	-102.7
	-101.4	-101.4	-101.4	-101.4
Receiver noise Figure (dB)	5	12	5	12
Receiver Thermal Noise Level (dBm)	-108.6	-101.6	-108.6	-101.6
	-104.7	-97.7	-104.7	-97.7
	-102.4	-95.4	-102.4	-95.4
	-99.4	-92.4	-99.4	-92.4
	-97.7	-90.7	-97.7	-90.7
	-96.4	-89.4	-96.4	-89.4

2.7. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS WIMAX

Los parámetros principales del sistema WiMAX900 y WiMAX1800 se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2.- Parámetros del sistema WiMAX900/1800

	WiMAX 900	WiMAX 1800
Downlink band (MHz)	925-960	1805-1880
Uplink band (MHz)	880-915	1710-1785
Carrier separation (MHz)	5. 10	5. 10
Channel raster (kHz)	100	100

	WiMAX 900		WiMAX 1800	
	BS	UE	BS	UE
Tx Power (Maximum) (dBm)	43	23	43	23
Antenna gain (dBi)	15 to 17	0	15 to 17	0
Feeder loss (dB)	3	1	3	1
Antenna height (m)	45 (Rural) 30 (Urban)	1.5	45 (Rural) 30 (Urban)	1.5
Antenna down-tilt (°)	3	-	3	-
BS-UE MCL (dB)	80 (Rural) 70 (Urban)	-	80 (Rural) 70 (Urban)	-
ACLR_1 (dB) (±5MHz for 5 MHz channel) (±10MHz for 10 MHz channel)	45	30	45	30
ACLR_1 (dB) (UTRA BW 3.84 MHz)	45	33	45	33
ACLR_2 (dB) (±10 MHz for 5 MHz channel) (±20 MHz for 10 MHz channel)	50	44	50	44
Receiver Bandwidth (MHz)	4.75 for WiMAX 5 MHz channel 9.5 for 10 MHz channel	4.75 for WiMAX 5 MHz channel 9.5 for 10 MHz channel	4.75 for WiMAX 5 MHz channel 9.5 for 10 MHz channel	4.75 for WiMAX 5 MHz channel 9.5 for 10 MHz channel
Receiver Thermal Noise Level (dBm)	-102.2 for 5 MHz channel -99.2 for 10 MHz channel	-99.2 for 5 MHz channel -96.2 for 10 MHz channel	-102.2 for 5 MHz channel -99.2 for 10 MHz channel	-99.2 for 5 MHz channel -96.2 for 10 MHz channel
Receiver reference sensitivity (dBm)	-101.3 for 5 MHz channel -98.3 for 10 MHz channel	-97.8 for 5 MHz channel -94.8 for 10 MHz channel	-101.3 for 5 MHz channel -98.3 for 10 MHz channel	-97.8 for 5 MHz channel -94.8 for 10 MHz channel

3 MEDIDAS

3.1. CALCULO DE RELACIÓN DE INTERFERENCIA EN CANALES ADYACENTES (ACIR) DE LTE/WIMAX A GSM Y UMTS

En este capítulo se estudian y analizan las medidas obtenidas en el reporte de la ESTI [2], donde se comprueba la coexistencia entre los sistemas en las bandas de frecuencia 900 y 1800MHz y como son afectados con los sistemas LTE actuales.

3.1.1. ACIR del enlace descendente de UMTS/LTE/WiMAX a GSM/ UMTS

El **ACLR/200 kHz** de UMTS, LTE y WiMAX con separación de canal de 300 kHz, es calculado a partir de la máscara espectral de la estación base. Los resultados se muestran a continuación.

$$ACIR = \frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \quad (\text{unidades naturales})$$

Tabla 3.- BS ACLR/200 kHz con 300 kHz de separación de canal.

	BS ACLR (dB/200 kHz)	GSM MS ACSn (dB)	ACIR (dB)
UMTS (5 MHz)	50	68,7	49,9
LTE (1,4 MHz)	50	58,7	49,5
LTE (3 MHz)	50	68,7	49,9
LTE (5 MHz)	50	68,7	49,9
LTE (10 MHz)	50	78,7	50,0
LTE (15 MHz)	50	78,7	50,0
LTE (20 MHz)	50	78,7	50,0
WiMAX(5 MHz)	50	68,7	49,9
WiMAX(10 MHz)	50	78,7	50,0

Se puede observar en la **Tabla 3** que la relación de interferencia de canal adyacente (ACIR) de LTE/WiMAX BS al enlace descendente de GSM, es en su mayoría resultado del ACLR, ya que la aportación de ACS es insignificante.

Tabla 4.-BS ACLR/3.84 MHz a 2.5 MHz de separación del canal.

	BS ACLR (dB/3,84 MHz)	UMTS UE ACS (dB/3.84 MHz)	ACIR (dB/3.84 MHz)
UMTS (5 MHz)	48,6	33	32,9
LTE (1,4 MHz)	48,6	33	32,9
LTE (3 MHz)	48,6	33	32,9
LTE (5 MHz)	48,6	33	32,9
LTE (10 MHz)	48,6	33	32,9
LTE (15 MHz)	48,6	33	32,9
LTE (20 MHz)	48,6	33	32,9
WiMAX(5 MHz)	48,6	33	32,9
WiMAX(10 MHz)	48,6	33	32,9

En la **Tabla 4** se puede observar que el ACIR (dB/3,84 MHz) con una separación de 2,5 MHz está determinado por la selectividad del canal UMTS del usuario.

3.1.2. ACIR del enlace ascendente de UMTS/LTE/WiMAX a GSM/UMTS

La relación de potencia de fuga del canal adyacente a 300 kHz de separación del canal, se muestra en la siguiente tabla. Para los equipos móviles de UMTS, LTE, y WiMAX, se puede observar como el ACLR de LTE 1,4 MHz y 3 MHz de ancho de banda tienen los valores menores de la tabla con una diferencia de hasta 6 dB en comparación con WiMAX 5 MHz.

Tabla 5.- UE ACLR/200 kHz a 300 kHz de separación del canal.

	UE ACLR (dB/200 kHz)	GSM BS ACS (dB)*	ACIR (dB)
UMTS (5 MHz)	31,2	83,7	31,2
LTE (1.4 MHz)	24,8	83,7	24,8
LTE (3 MHz)	27,8	83,7	27,8
LTE (5 MHz)	29,8	83,7	29,8
LTE (10 MHz)	32,8	83,7	32,8
LTE (15 MHz)	34,8	83,7	34,8
LTE (20 MHz)	35,8	83,7	35,8
WiMAX(5 MHz)	30	83,7	30
WiMAX(10 MHz)	30	83,7	30

***NOTA:** para esta tabla se usó un ACS de GSM1800 BS, en GSM900 el ACS es varios dB mayor que el de la banda 1800.

La **Tabla 5** muestra que la relación de interferencia del canal adyacente de los equipos móviles UMTS/LTE/WiMAX a la estación base GSM esta predominada por el ACLR.

La relación de potencia de fuga del canal adyacente a 2,5 MHz de separación del canal (ACLR/3,84 MHz), se calculó siguiendo la máscara de los equipos móviles. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.-UE ACLR/3.84 MHz a 2.5 MHz de separación del canal.

	UE ACLR (dB/3,84 MHz)	UMTS BS ACS (dB/3,84 MHz)	ACIR (dB/3,84 MHz)
UMTS (5 MHz)	33	46,4	32,8
LTE (1.4 MHz)	33	46,4	32,8
LTE (3 MHz)	33	46,4	32,8
LTE (5 MHz)	33	46,4	32,8
LTE (10 MHz)	33	46,4	32,8
LTE (15 MHz)	33	46,4	32,8
LTE (20 MHz)	33	46,4	32,8
WiMAX(5 MHz)	33	46,4	32,8
WiMAX(10 MHz)	33	46,4	32,8

En la **Tabla 6** se observa que la contribución del ACS para el cálculo del ACIR es poco significativo ya que es mucho mayor que el ACLR.

3.2. CÁLCULOS DE RECHAZO DEL RECEPTOR DE LTE/WIMAX Y LOS VALORES DE ACS PARA LA INTERFERENCIA DE GSM Y UMTS

3.2.1. BS Rechazo del receptor debida al bloqueo por banda estrecha

Los niveles de rechazo del receptor de la estación base UMTS, LTE y WiMAX a 300 kHz del borde del canal, proveniente del bloqueo por banda estrecha se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.-Rechazo del receptor de la estación base a 300 kHz debido al bloqueo por banda estrecha.

BS	Frecuencia offset (kHz)	ACS	Rechazo (dB)	Señal interferente
UTRA-FDD (5MHz)	300	-47 dBm	51,4	GSM
LTE(1.4 MHz)	252,5	-49 dBm	54,9	LTE 1 RB

BS	Frecuencia offset (kHz)	ACS	Rechazo (dB)	Señal interferente
LTE(3 MHz)	247,5	-49 dBm	50,9	LTE 1 RB
LTE(5 MHz)	342,5	-49 dBm	48,7	LTE 1 RB
LTE(10 MHz)	347,5	-49 dBm	48,7	LTE 1 RB
LTE(15 MHz)	362,5	-49 dBm	48,7	LTE 1 RB
LTE(20 MHz)	342,5	-49 dBm	48,7	LTE 1 RB
WiMAX (5 MHz)	300	-53 dBm	44,4	GSM
WiMAX (10 MHz)	300	-50 dBm	44,4	GSM

Los resultados mostrados en la **Tabla 7**, muestran que el rechazo del receptor WiMAX BS a una frecuencia de offset de 300 kHz es 7 dB menor que UMTS BS.

3.2.2. Rechazo del receptor del UE debida al bloqueo por banda estrecha

Los resultados del rechazo del receptor en los terminales de usuario a una frecuencia de offset de 300 kHz, debida al bloqueo por banda estrecha se muestran en la siguiente tabla. Se debe tener en cuenta que para los canales de LTE 15 MHz y 20 MHz no está definida la sensibilidad del receptor en la banda de 900 MHz, por tanto, el bloqueo por banda estrecha para estos canales puede no ser aplicable.

Tabla 8.-Rechazo del receptor en los terminales de usuario a 300 kHz debido al bloqueo por banda estrecha.

BS	Frecuencia offset (kHz)	Prueba ACS	Rechazo (dB) (NF=12 dB)	Rechazo (dB) (NF=8 dB)	Señal Interferente
UTRA-FDD (5MHz)	300	-56 dBm	30,6	34,6	GSM
LTE(1.4 MHz)	207,5	-55 dBm	27,7	31,7	CW
LTE(3 MHz)	202,5	-55 dBm	27,8	31,8	CW
LTE(5 MHz)	207,5	-55 dBm	27,7	31,7	CW
LTE(10 MHz)	212,5	-55 dBm	27,9	31,9	CW
LTE(15 MHz)	202,5	-55 dBm	25	29	CW
LTE(20 MHz)	207,5	-55 dBm	21,6	25,6	CW
WiMAX (5 MHz)	300	-53 dBm	26,3	30,3	GSM
WiMAX (10 MHz)	300	-53 dBm	26,4	30,4	GSM

En la **Tabla 8** se puede ver como LTE y WiMAX UE tienen un rechazo del receptor menor que UMTS UE, a una frecuencia offset de 300 kHz.

3.2.3. Rechazo del receptor en BS debida a la selectividad del canal adyacente (ACS)

Los valores de ACS a 2,5 MHz de frecuencia offset de UMTS/LTE/WiMAX BS están representados en la siguiente tabla. También se puede ver su respectivo ACIR (dB) con un ACLR de 33 dB en UMTS UE.

Tabla 9.-ACS del receptor BS a 2,5 MHz de frecuencia offset y ACIR.

BS	Frecuencia offset (MHz)	ACS (dB)	UMTS UE ACLR (dB)	ACIR (dB)
UTRA-FDD (5 MHz)	2,5	46,4	33	32,8
LTE(1.4 MHz)	2,5	51,9	33	32,9
LTE(3 MHz)	2,5	47,9	33	32,8
LTE(5 MHz)	2,5	45,7	33	32,7
LTE(10 MHz)	2,5	42,7	33	32,5
LTE(15 MHz)	2,5	40,9	33	32,3
LTE(20 MHz)	2,5	39,7	33	32,1
WiMAX (5 MHz)	2,5	46	33	32,7
WiMAX (10 MHz)	2,5	No definida	33	

En la **Tabla 9**, el valor de ACS para LTE 1,4 MHz es obtenido con un nivel de -43 dBm en la banda de bloqueo, el valor de ACS para LTE 3 MHz es obtenido con un valor de prueba de ACS de -52 dBm a una frecuencia offset de 1,5 MHz. El rechazo del receptor de la estación base, a 2,5 MHz de frecuencia offset para LTE 3 MHz, debe ser mejor que los 47,9 dB que se muestra en la tabla.

Se puede ver que en el caso de coexistencia entre UMTS UE y LTE/WiMAX BS, el enlace ascendente es equivalente al caso de UMTS UE a UMTS BS (ACIR=32,8 dB).

3.2.4. Rechazo del receptor en UE debido a la selectividad del canal adyacente (ACS)

Para LTE 5 MHz y WiMAX 5 MHz, el valor de ACS es de 33 dB, y para un ACLR de 48,6 dB en UMTS BS el ACIR es de 32,9 dB. Para otros valores de anchos de banda de canal en LTE y WiMAX 10 MHz no existe información técnica suficiente para calcular su valor de rechazo del receptor en UE a 2,5 MHz de frecuencia de offset.

Tabla 10.-ACS del Receptor UE a 2,5 MHz de frecuencia offset y ACIR.

BS	Frecuencia offset (MHz)	ACS (dB)	UMTS BS ACLR (dB)	ACIR (dB)
UTRA-FDD (5MHz)	2,5	33	48,6	32,9
LTE (5 MHz)	2,5	33	48,6	32,9
WiMAX (5 MHz)	2,5	33	48,6	32,9

3.3. RASTERS DEL CANAL PARA GSM/UMTS/LTE/ WIMAX Y SUS IMPLICACIONES EN LA SEPARACIÓN DE LAS PORTADORAS

3.3.1. Rasters del canal de GSM, UMTS, LTE y WiMAX

Los rasters del canal (*Channel raster*) de GSM, UMTS, LTE y WiMAX se resumen en la **Tabla 11**. La separación de las portadoras entre dos sistemas que operan en bandas adyacentes depende de los resultados de las pruebas de coexistencia, pero la implementación de la separación entre portadoras es directamente afectada por el raster del canal.

Tabla 11.- Rasters del canal (*Channel raster*).

GSM	200 kHz
UMTS	200 kHz
LTE	100 kHz
WiMAX	100 kHz

3.3.2. Separación entre portadora GSM y UMTS/LTE/WiMAX

En la siguiente figura, se puede ver un ejemplo de la disposición de frecuencia que pueden tener las portadoras de GSM y UMTS. En este caso la separación entre portadoras es de 2,8 MHz.

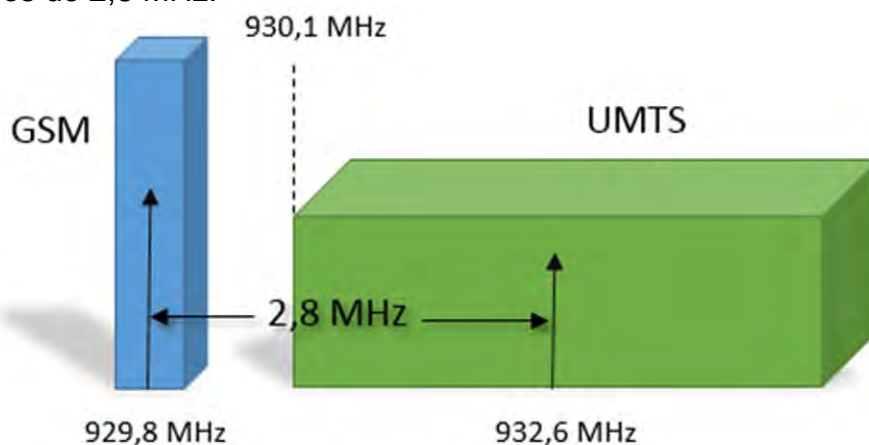


Figura 8.-Disposición de frecuencias para portadora de GSM y UMTS.

En la **Tabla 12** hay ejemplos de posibles separaciones entre portadoras GSM y portadoras de UMTS/LTE/WiMAX basado en los *channel raster*s. Existen más combinaciones válidas.

Tabla 12.-Posibles separación entre portadoras GSM y UMTS/LTE/WiMAX.

Sistema	Portadora (MHz)			Separación entre portadoras (MHz)			De la portadora GSM al borde del canal UMTS/LTE/WiMAX (kHz)		
GSM	929,8			-			-		
UMTS (5 MHz)	932,4	932,6	932,8	2,6	2,8	3,0	100	300	500
LTE (1.4 MHz)	930,7	930,8	930,9	0,9	1,0	1,1	200	300	400
LTE (3 MHz)	931,5	931,6	931,7	1,7	1,8	1,9	200	300	400
LTE (5 MHz)	932,5	932,6	932,7	2,7	2,8	2,9	200	300	400
LTE (10 MHz)	935	935,1	935,2	5,2	5,3	5,4	200	300	400
LTE (15 MHz)	937,5	937,6	937,8	7,7	7,8	7,9	200	300	400
LTE (20 MHz)	940,0	940,1	940,2	10,2	10,3	10,4	200	300	400
WiMAX (5 MHz)	932,5	932,6	932,7	2,7	2,8	2,9	200	300	400
WiMAX (10 MHz)	935	935,1	935,2	5,2	5,3	5,4	200	300	400

Se puede ver en la tabla anterior, que es posible una separación de 300 kHz entre la portadora de GSM y el borde del canal UMTS, LTE o WiMAX.

3.3.3. Cortes del sistema GSM debido a interferencias de LTE/WiMAX

El siguiente análisis considera la implicación de los cortes que sufre GSM derivados de la separación de 200 kHz y 300 kHz de la portadora GSM al borde del canal UMTS/LTE/WiMAX.

Primero se observara un ACIR a 300 kHz, obtenido con la suma de las potencias de cuatro canales de 200 kHz.

1. 2do Canal adyacente (cercano al interferente).
2. 1er Canal adyacente (cercano al interferente).
3. Canal deseado.
4. 1er Canal adyacente (lejos del interferente).

En la **Figura 9** se observa la relación de estos canales con la emisión de banda ancha adyacente.

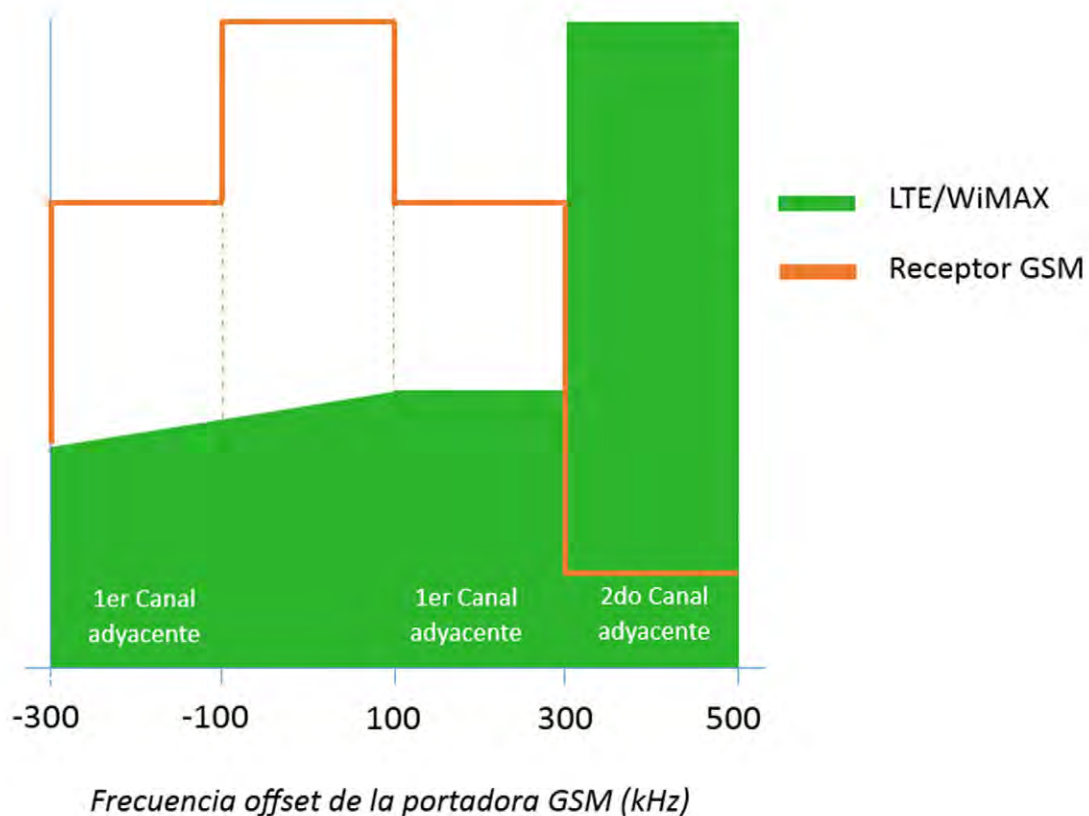


Figura 9.-Receptor de canal adyacente GSM (300 kHz).

El sistema interferente en la banda de emisión, solo aparece en el 2do canal adyacente del receptor GSM.

La suma de las potencias para 300 kHz de separación son las siguientes:

	OOB (dBm)	ACS (dB)	Potencia recibida (dBm)	Potencia recibida (mW)	
2do canal adyacente	29,0206	50	-20,9794	0,007981	
1er canal adyacente	-5,76091	18	-23,760913	0,004206	
Co-canal	-7,17512	0	-7,1751223	0,191641	
1er canal adyacente	-10,1751	18	-28,175122	0,001522	
TOTAL				0,20535	-6,9 dBm

Por tanto, el $ACIR$ es $43 - (-6,9) = 49,9 \text{ dB}$

En la **Figura 5**, se puede observar un ejemplo para una separación de 200 kHz entre el borde del canal interferente y el centro del canal GSM.

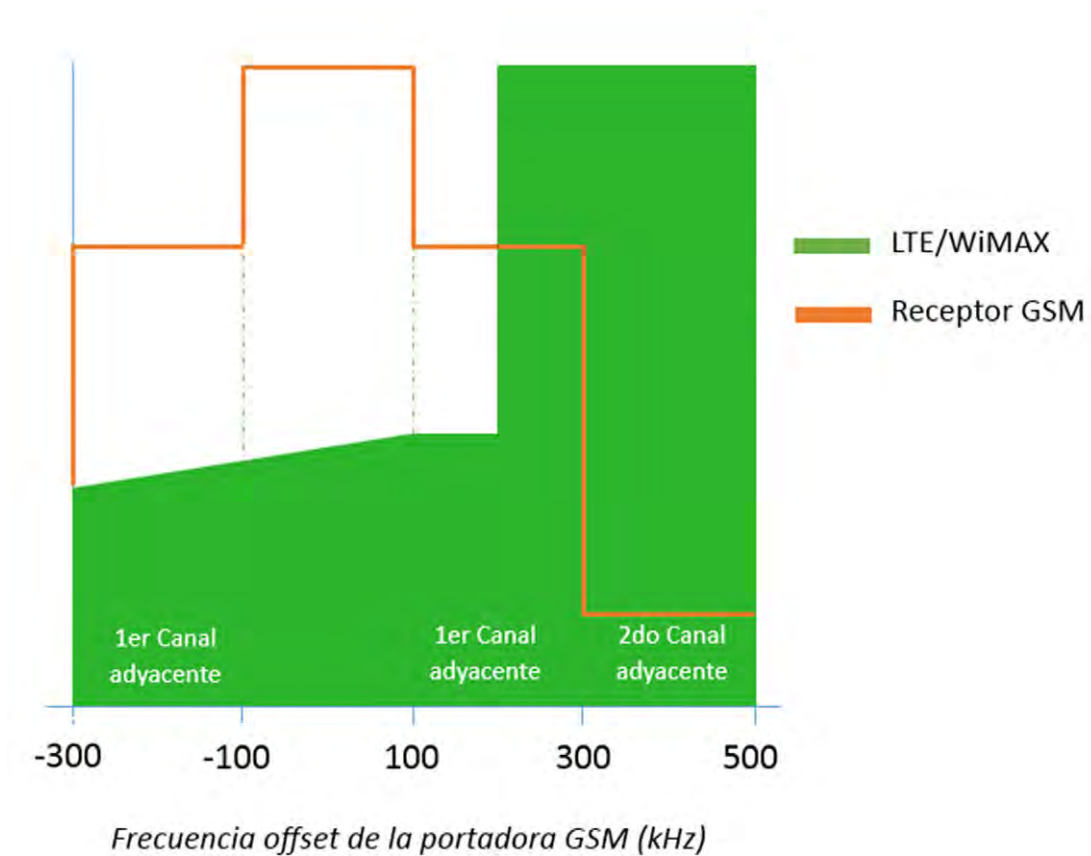


Figura 10.-Receptor de canal adyacente GSM (200 kHz).

El sistema interferente en la banda de emisión, aparece dentro del 1er canal adyacente del receptor GSM.

	OOB (dBm)	ACS (dB)	Potencia recibida (dBm)	Potencia recibida (mW)	
2do canal adyacente	29,0206	50	-20,9794	0,007981	
1er canal adyacente	26,01174	18	8,0117439	6,326659	
Co-canal	-6,10997	0	-6,1099743	0,244908	
1er canal adyacente	-8,67512	18	-26,675122	0,00215	
TOTAL				6,581698	-8,2 dBm

Por tanto, $ACIR\ 43 - (8,2) = 34,8\ dB$. El cambio de pasar de una separación de 200 kHz a una de 300 kHz supone una degradación de 15 dB de ACIR.

En la siguiente tabla se puede ver un resumen de la pérdida de capacidad por los cortes en el enlace descendente de GSM, debida a la interferencia en el canal adyacente.

ACIR (dB)	Pérdidas de capacidad del downlink (%)
15	71,84215909
20	41,13877266
25	17,88612643
30	6,02937805
35	1,73542824
40	0,42671551
45	0,08533184
50	0,01878589

Por esta razón, las pérdidas de capacidad que sufre GSM para las dos separaciones de frecuencia estudiadas con antelación son las siguientes:

Separación (kHz)	ACIR (dB)	Cortes de GSM (%)
300	50	0,02
200	35	1,74

El criterio para determinar los cortes de GSM es el determinado por el 3GPP ($C/I = 9$ dB). En una red real, especialmente para el servicio de datos GSM (GRPS/EDGE), el requerimiento de C/I suele ser mayor a 9 dB. En este caso la reducción en la frecuencia offset de 300 kHz a 200 kHz, puede introducir un porcentaje mayor al 1,74% de cortes en el sistema GSM.

3.4. COEXISTENCIA ENTRE LTE Y GSM

3.4.1. Interferencia de LTE (EUTRA) a GSM

- a) Cortes del enlace descendente (DL) GSM debido a interferencias de LTE DL

Los resultados de las simulaciones de interferencia de LTE a GSM se resumen en la figura siguiente. Se usó el mismo criterio de $C/I = 9$ dB que propone la 3GPP para determinar los cortes en el enlace de bajada del sistema GSM.

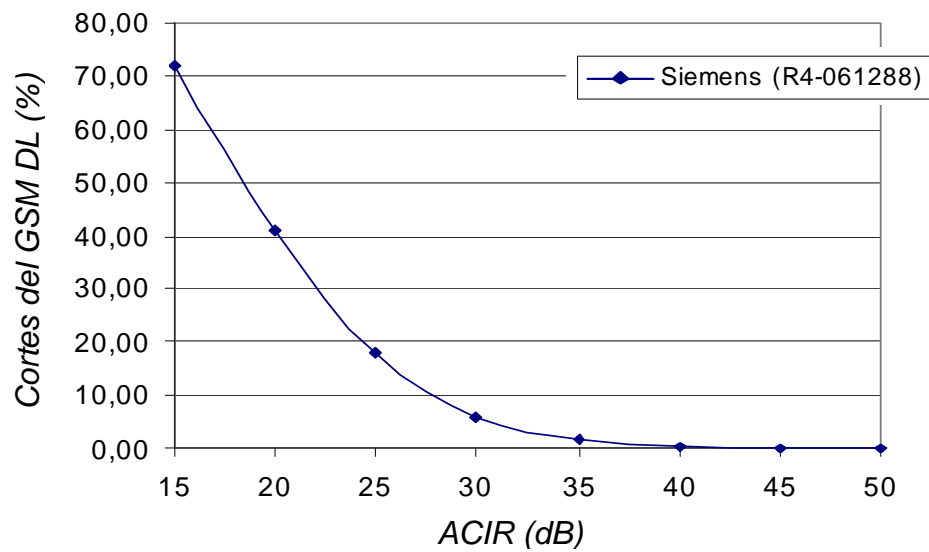


Figura 11.-Cortes del enlace descendente GSM.

Se puede ver que para mantener un 5% de cortes en el GSM DL es necesario un ACIR de aproximadamente 30 dB como describe el 3GPP. Se considera como factor dominante en el ACIR el UTRA/EUTRA ACLR, no el GSM ACS. En caso de restringir más la protección de GSM por ejemplo al 2%, se necesitaría un ACIR de 35 dB. Como los requerimientos de EUTRA/LTE y WiMAX son mayores que esto, la degradación del sistema adyacente GSM se ve poco afectado.

b) Cortes del enlace ascendente (UL) GSM debido a interferencias de LTE
UL

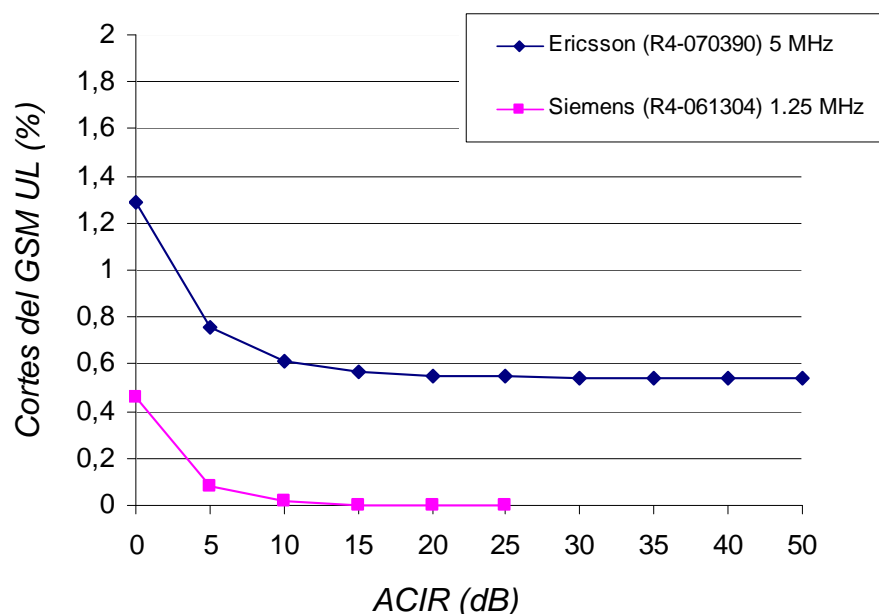


Figura 12.-Cortes del enlace ascendente GSM.

Los resultados de la interferencia producida por el enlace ascendente (UL) de LTE a GSM UL muestran que los cortes son muy escasos, incluso para niveles muy bajos de ACIR, por ejemplo, para un ACIR = 5 dB los cortes de GSM UL son inferiores al 0,8%, como se puede observar en la **Figura 12**.

Se debe tener en cuenta que los resultados de las simulaciones de interferencia de LTE a GSM, son para un escenario específico y no toman en cuenta todos los posibles anchos de banda de LTE.

En base a las simulaciones y los resultados que se han mencionado anteriormente, se puede concluir que la separación de 300 kHz entre el borde del canal LTE y la portadora GSM, es suficiente para proteger el enlace ascendente y descendente de GSM.

La 3GPP sugiere que los resultados obtenidos para la banda de 900 MHz puedan ser trasladados a la banda de 1800 MHz, suponiendo que el tamaño de la células de cobertura sea proporcional a las pérdidas del trayecto, ya que aumento de frecuencia supone pérdidas mayores.

3.4.2. Interferencia de GSM a LTE (EUTRA)

La interferencia causada por el enlace ascendente y descendente (UL/DL) de GSM hacia LTE (UL/DL), no ha sido analizada, sin embargo los resultados obtenidos en los estudios sobre la coexistencia entre UMTS y GSM hechos por la 3GPP, muestran que el factor dominante de interferencia de GSM a UMTS es el rendimiento del bloqueo de los receptores de la estación base (BS) y de los terminales de usuarios (UE) de UMTS.

Las características del rechazo en los receptores de las estaciones base y los terminales de usuario de UMTS y LTE, proveniente del bloqueo de banda estrecha, están definidas por la 3GPP y sus especificaciones técnicas están resumidas en la **Tabla 7**. El rechazo del receptor debido al bloqueo de banda estrecha para LTE BS es 2,7 dB menor que el de UMTS BS, pero considerando la diferencia del tipo de señal interferente, el rendimiento del bloqueo de banda estrecha de UMTS BS y LTE BS pueden ser considerados iguales a una frecuencia offset de 300 kHz del borde del canal LTE/UMTS.

El rechazo del receptor en LTE UE por el bloqueo de banda estrecha, es varios niveles menor que el de UMTS UE (**Tabla 8**) dependiendo del ancho de banda LTE. Para 5 MHz y 10 MHz, es 3 dB peor a una frecuencia offset de 300 kHz al borde del canal. Debido a que el sistema OFDM usado en LTE es más robusto

que el sistema WCDMA usado en UMTS, la interferencia de GSM DL a LTE UE no debería ser mayor problema. En la práctica, para disminuir la interferencia producida por el GSM DL, no se debe colocar en el primer canal adyacente a LTE (a frecuencia offset de 300 kHz), el canal BCCH (GSM) que no tenga control de potencia.

3.4.3. Conclusiones

Los resultados de las simulaciones de interferencia que produce LTE a GSM en el enlace ascendente y descendente, muestran que ambos sistemas pueden coexistir siempre que la separación entre la portadora GSM y el borde del canal LTE adyacente sea 300 kHz.

Aunque el bloqueo por banda estrecha de la estación base LTE es algo peor (2,7 dB) que la UMTS BS, se pueden considerar equivalentes a una frecuencia offset de 300 kHz entre la portadora GSM y el borde del canal LTE, debido a la diferencia de las señales interferentes que considera UMTS BS y la LTE BS. El mismo resultado aplica para los terminales de usuarios, por tanto se puede concluir que la interferencia que genera el sistema GSM a LTE no es un problema.

Se debe mencionar, que los niveles de rechazo del receptor LTE se obtienen por los valores del bloqueo de banda estrecha, los cuales se basan en una separación de 200 kHz entre el borde del canal GSM y el borde del canal LTE. En caso de que la separación entre canales sea más estrecha estos valores no pueden ser aplicados. En este supuesto caso de una separación menor, la interferencia de LTE a GSM no sería problema, por el contrario, la señal LTE podría sufrir grandes interferencias por GSM.

En base a los análisis anteriores se muestra un resumen (**Tabla 13**) de la separación entre GSM y LTE para evitar interferencias.

Tabla 13.- Separación mínima entre portadora GSM y portadora LTE.

	Separación en frecuencia entre la portadora GSM y la portadora LTE	Separación en frecuencia entre la portadora GSM y el borde del canal LTE	Separación en frecuencia entre el borde del canal GSM y el borde del canal LTE
LTE 1.4 MHz	1 MHz	300 kHz	200 kHz
LTE 3 MHz	1,8 MHz	300 kHz	200 kHz
LTE 5 MHz	2,8 MHz	300 kHz	200 kHz
LTE 10 MHz	5,3 MHz	300 kHz	200 kHz
LTE 15 MHz	7,8 MHz	300 kHz	200 kHz
LTE 20 MHz	10,3 MHz	300 kHz	200 kHz

Los valores recomendados que se muestran en la tabla anterior pueden ser menores en caso de que exista algún acuerdo entre operadoras, y en el caso de que existan otros factores que reduzcan la interferencia, como es el caso del uso de mejores equipos de transmisión en las estaciones base.

3.5. COEXISTENCIA ENTRE LTE (EUTRA) Y UMTS (UTRA)

La coexistencia entre UTRA y EUTRA ha sido estudiada para una frecuencia de 2 GHz y los resultados se resumen en el apartado 3.5.1 y 3.5.2 que se pueden ver a continuación.

3.5.1. Interferencia de LTE (EUTRA) a UMTS

Los resultados de las simulaciones se basan en un sistema agresor E-UTRA de 5 MHz en la banda de 2 GHz, y una implementación en macrocélulas (rango de 500 m) en un área urbana.

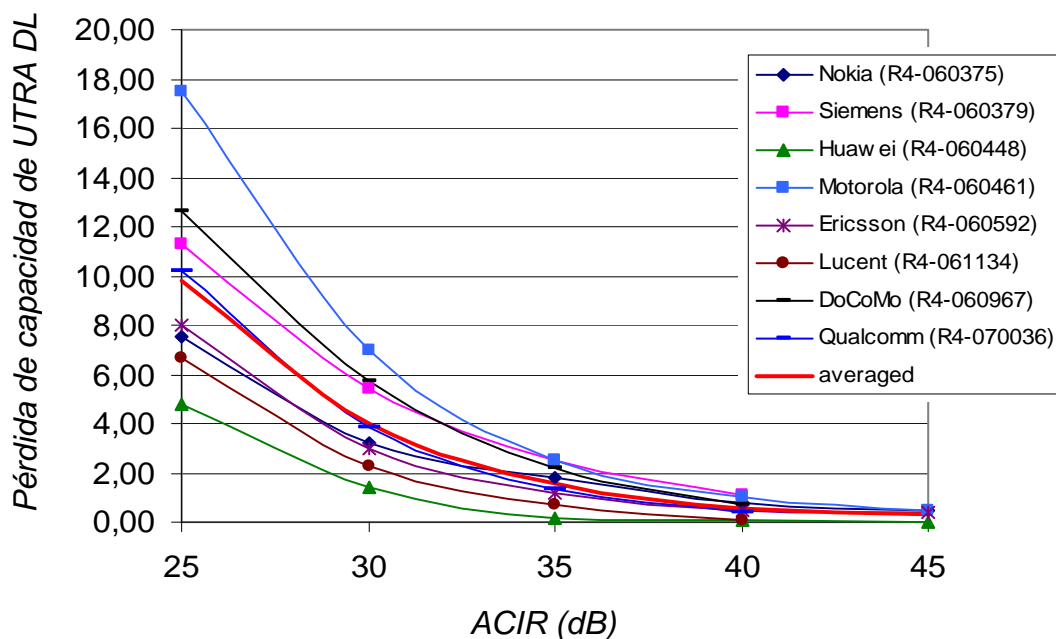


Figura 13.- Pérdida de capacidad del enlace descendente de UTRA FDD debido a interferencia de LTE.

En la **Figura 13** se observa que para una pérdida menor del 5% de capacidad del enlace descendente de UTRA-FDD, es necesario un ACIR de alrededor de 28 dB. Se puede ver en la **Tabla 10**, que el cálculo del ACIR de LTE a UMTS DL es de 32,9 dB a una frecuencia offset de 2,5 MHz entre la portadora UMTS y el borde del canal LTE.

Los resultados de las pérdidas en el enlace ascendente debido a la interferencia de LTE a UMTS se muestran en la **Figura 14**.

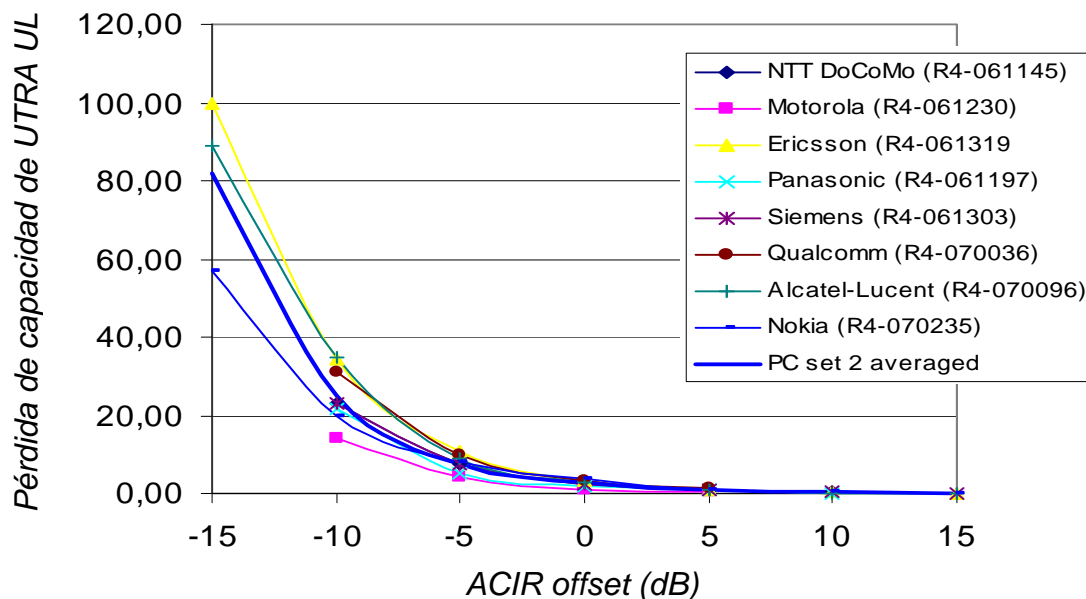


Figura 14.-Pérdida de capacidad del enlace ascendente de UTRA FDD debido a interferencia de LTE.

Para una pérdida del 5% de la capacidad del enlace ascendente se puede ver en la **Figura 14** que es necesario un ACIR offset de -3 dB (relativos a 33 dB), que equivale a un ACIR=30 dB, este valor comprueba los requisitos del ACIR de LTE a UMTS UL mostrados en Tabla 9 (ACIR=32,7 dB).

3.5.2. Interferencia de UMTS a LTE (EUTRA)

Debido a la falta de resultados en los informes del 3GPP sobre interferencia de UMTS a LTE, no es posible presentar información concreta en esta sección. Sin embargo, la interferencia que puede producir UMTS a LTE no es en ningún caso peor que la generada por sí mismo (LTE vs LTE). La interferencia de LTE a LTE se describe en la sección 3.6, y los resultados son suficientes para determinar que UMTS no causará gran interferencia a LTE.

3.5.3. Conclusiones

En base a los resultados de los análisis de interferencia obtenidos, se sugiere, que la separación en frecuencia entre el borde del canal LTE (EUTRA-FDD) y la portadora UTRA sea de 2,5 MHz o más. La separación necesaria entre las portadoras UMTS y LTE para diferentes anchos de banda se resumen la **Tabla 14**.

Tabla 14.-Separación en frecuencia entre UMTS y LTE.

	Separación en frecuencia entre la portadora UMTS y la portadora LTE	Separación en frecuencia entre la portadora UMTS y el borde del canal LTE	Separación en frecuencia entre el borde del canal UMTS y el borde del canal LTE
LTE 1.4 MHz	3,2 MHz	2,5 MHz	0 kHz
LTE 3 MHz	4 MHz	2,5 MHz	0 kHz
LTE 5 MHz	5 MHz	2,5 MHz	0 kHz
LTE 10 MHz	7,5 MHz	2,5 MHz	0 kHz
LTE 15 MHz	10 MHz	2,5 MHz	0 kHz
LTE 20 MHz	12,5 MHz	2,5 MHz	0 kHz

3.6. COEXISTENCIA ENTRE LTE Y SISTEMAS A 900/1800 MHZ

La coexistencia entre sistemas LTE ha sido estudiada para una frecuencia de 2 GHz. Los resultados provienen de informes del 3GPP y se resumen en esta sección.

3.6.1. Resultados de simulaciones de interferencias entre sistemas LTE a 900/1800 MHz

Los resultados de las simulaciones suponen como agresor y víctima un sistema LTE de 10 MHz, se trabajó en la banda de 2 GHz y se usó una implementación en macrocélulas (rango de 500 m) en un área urbana.

El resultado del promedio de pérdida en el rendimiento del enlace descendente de EUTRA se puede observar en la **Figura 15**, y el promedio de pérdida para un rendimiento de la función de distribución acumulativa (CDF) del 5% se muestra en la **Figura 16**.

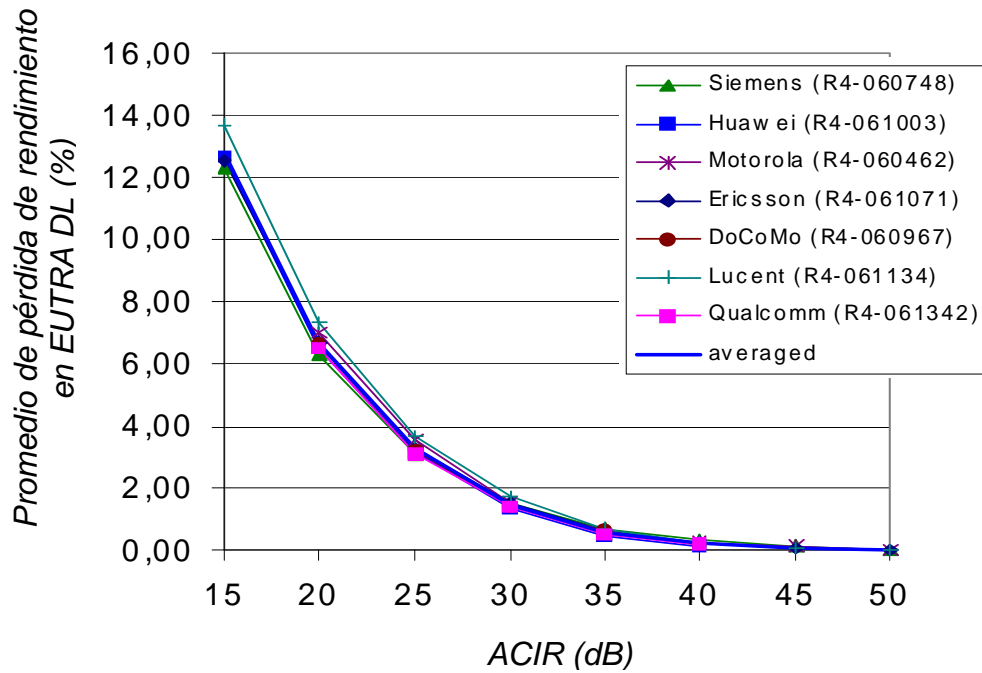


Figura 15.-Promedio de pérdidas del enlace descendente de LTE (E-UTRA).

La **Figura 15** muestra que el ACIR requerido para conseguir un promedio de pérdidas menores o iguales al 5% es de 24 dB. Según los parámetros LTE BS ACLR=45 dB y UE ACS=33 dB, se obtiene un ACIR=32,7 dB, el cual es superior a los 24 dB requeridos para este análisis.

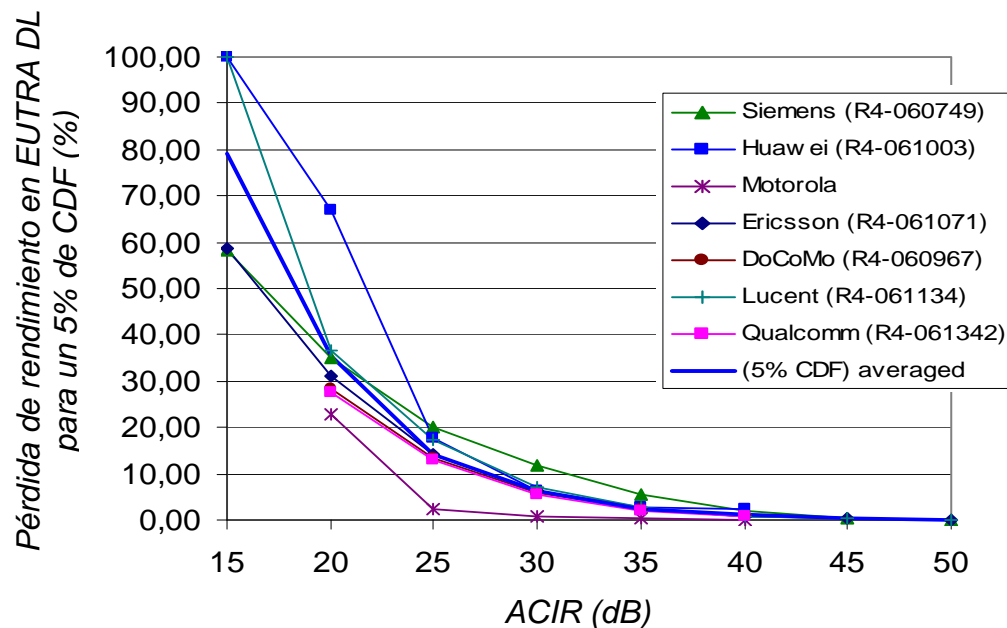


Figura 16.-Pérdidas de rendimiento en LTE (EUTRA) DL para un CDF del 5%.

El resultado del promedio de pérdida en el rendimiento del enlace ascendente de EUTRA se puede observar en la **Figura 17**, y el promedio de pérdida para un rendimiento de la función de distribución acumulativa (CDF) del 5% se muestra en la **Figura 18**.

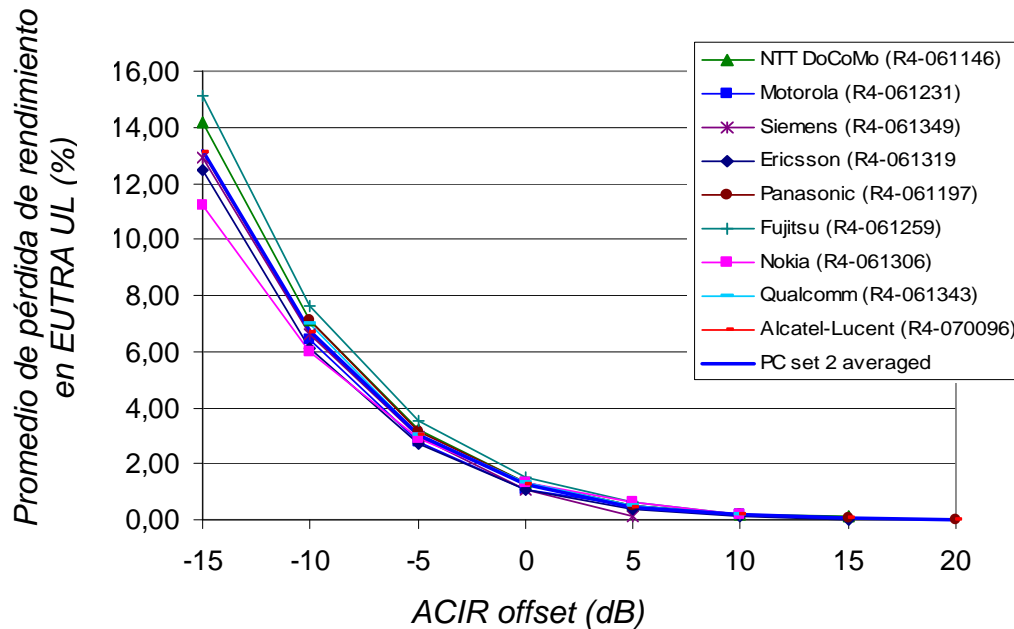


Figura 17.-Promedio de pérdida de rendimiento del enlace ascendente de LTE (EUTRA).

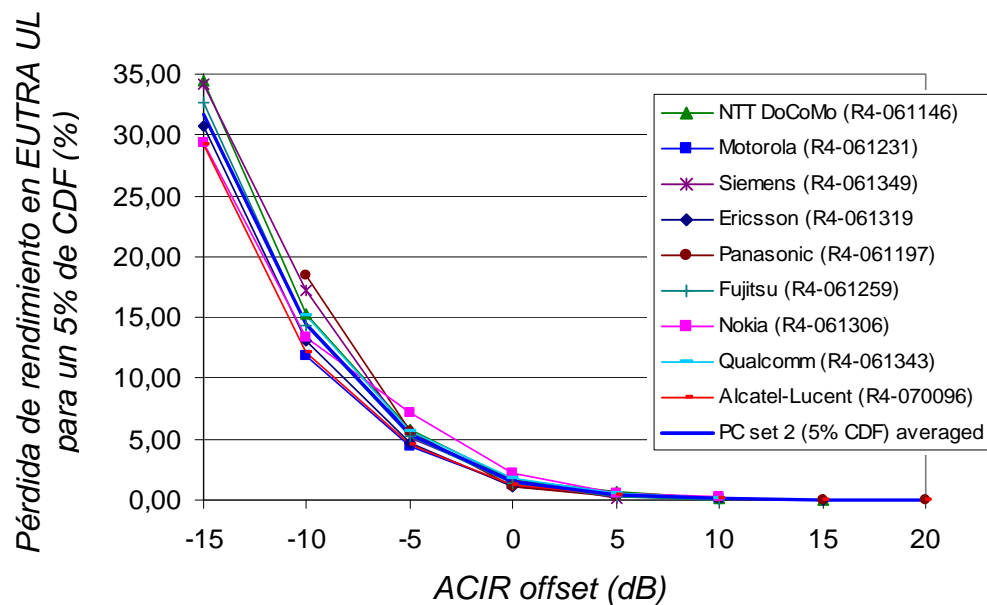


Figura 18.-Pérdidas de rendimiento en LTE (EUTRA) UL para un CDF del 5%.

En la gráfica anterior observamos que para un promedio de pérdidas de rendimiento del 5% es necesario un ACIR offset de -7 dB, lo que equivale a un UL $ACIR=30-7=23$ dB. Con los parámetros de los terminales de usuario LTE de $ACLR=30$ dB, y de estación base LTE $ACS=45,7$ dB se obtiene un $ACIR=29,9$ dB, el cual es superior a los 23 dB dados por la simulación.

3.6.2. Separación entre portadoras de sistemas LTE (EUTRA) en las bandas de 900/1800 MHz

Este apartado se basa en los resultados de las simulaciones sobre la coexistencia entre sistemas LTE, y los valores de ACIR alcanzados al implementar dos sistemas EUTRA de forma no-coordinada, en portadoras adyacentes con “separación nominal de canal”. La separación nominal de canal está definida por el 3GPP como la mitad de la suma del ancho de banda de cada portadora.

Debido a esta definición de separación de canal, no hay una banda de guarda explícita entre las portadoras. La separación nominal entre portadoras adyacentes LTE para diferentes anchos de banda se resumen en la **Tabla 15**. En consecuencia la separación en frecuencia entre el borde de un canal LTE y el borde del canal LTE adyacente es 0 kHz.

Tabla 15.-Separación nominal de canal entre frecuencias centrales de portadoras adyacentes.

Ancho de banda del canal (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
1,4	1,4	2,2	3,2	5,7	8,2	10,7
3	2,2	3	4	6,5	9	11,5
5	3,2	4	5	7,5	10	12,5
10	5,7	6,5	7,5	10	12,5	15
15	8,2	9	10	12,5	15	17,5
20	10,7	11,5	12,5	15	17,5	20

(Página dejada intencionalmente en blanco)

4 SIMULACIONES

Las simulaciones se van a realizar en tres escenarios distintos, donde el objetivo es determinar la interferencia que causa LTE sobre los sistemas en bandas adyacentes. Para poder llevar a cabo las medidas de ACIR será necesario calcular primero la potencia que transmite el canal interferente y luego la SIR (Relación Señal a Ruido).

Los distintos escenarios de pruebas serán sobre un entorno urbano. Se construyó un pequeño sector de una ciudad con ayuda de la herramienta de simulación, los materiales de las edificaciones están debidamente caracterizados con la permitividad relativa de los mismos, las paredes por ejemplo son de concreto de 24 cm, y tienen propiedades de reflexión y difracción (la penetración en interiores se deshabilitó en todas las simulaciones), en la **Figura 19** y **Figura 20** se observa el sector de prueba.

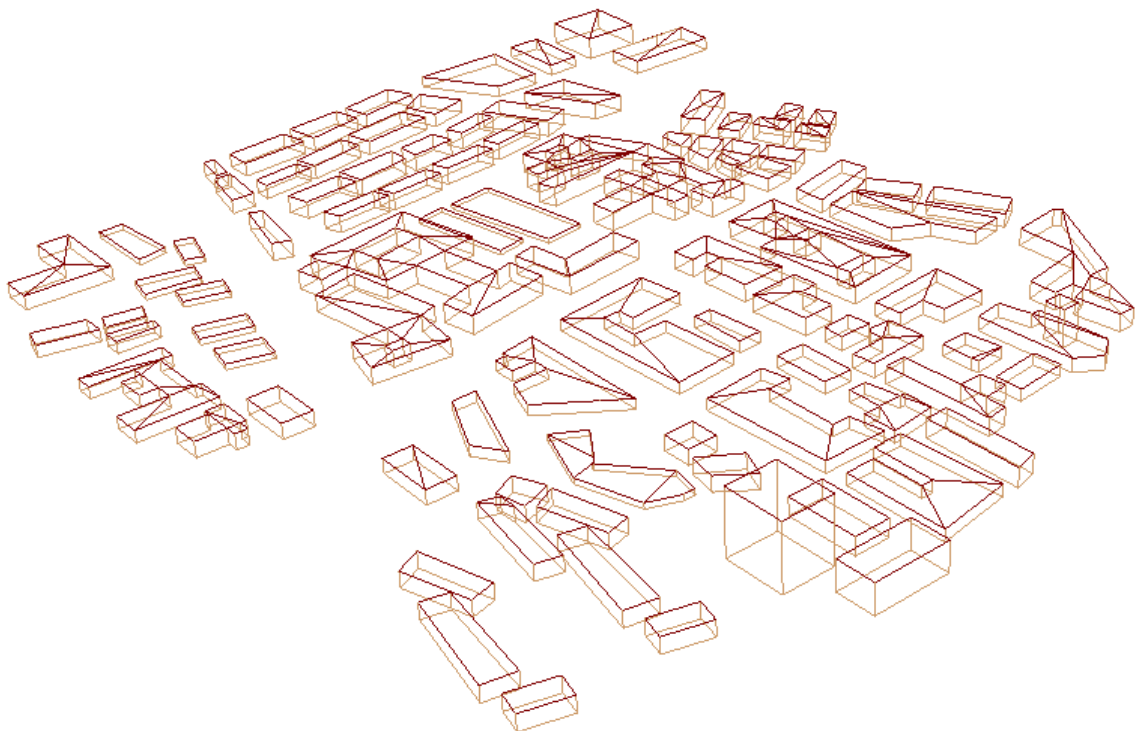


Figura 19.- Esquema del sector de pruebas.

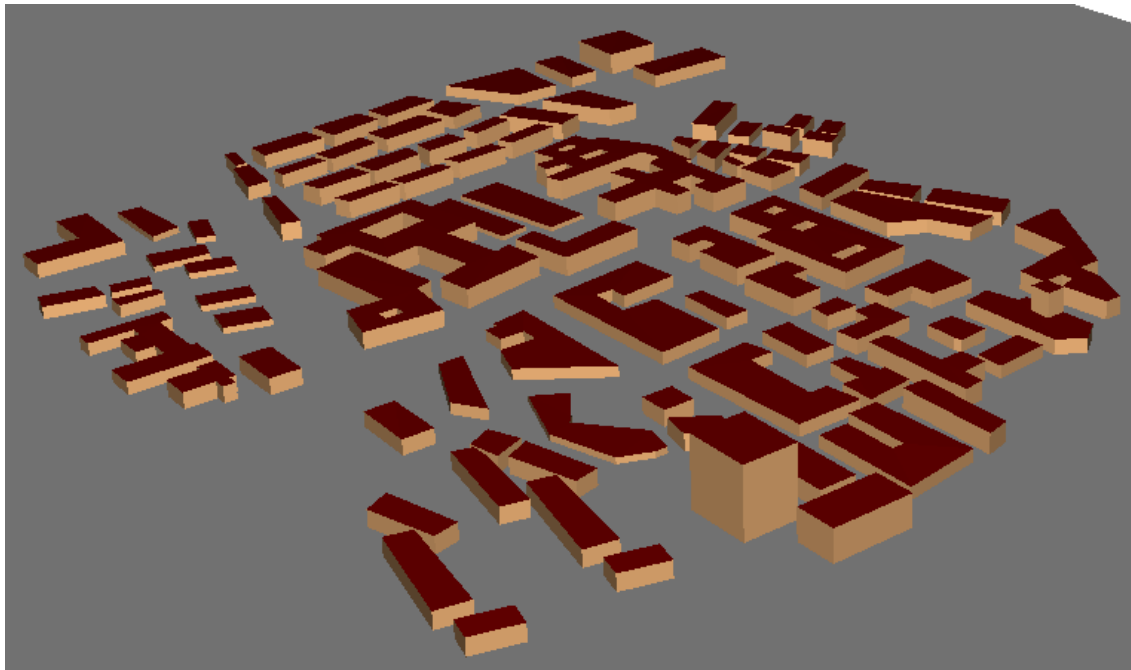


Figura 20.- Sector de prueba.

Las antenas son sectoriales de 120° y están ubicadas a una altura de 30 m sobre el terreno, el diagrama de radiación se observa en **Figura 21**.

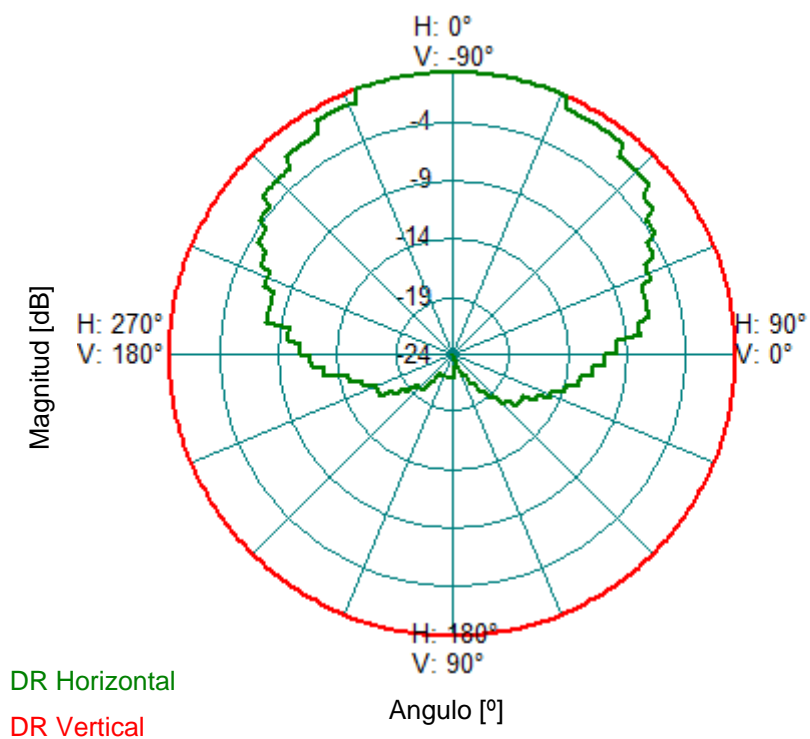


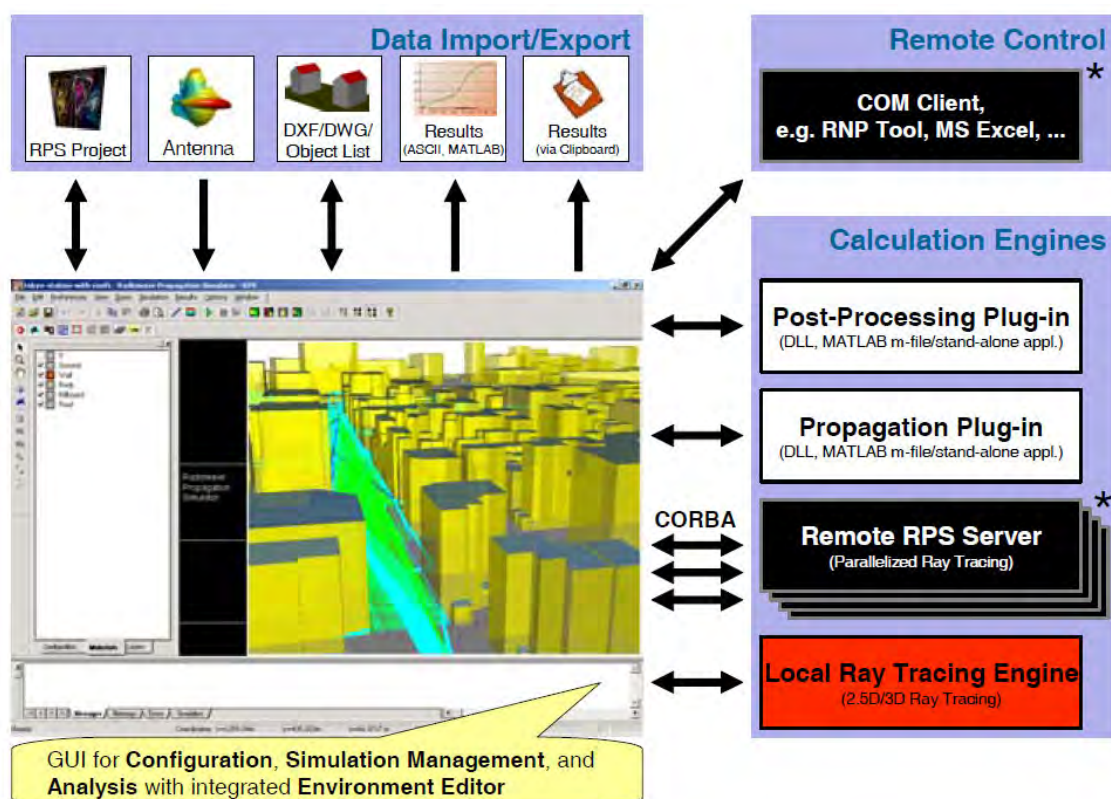
Figura 21.- Diagrama de radiación de la antena.

4.1. SOFTWARE DE SIMULACIÓN (RADIO PLAN)

Radio Plan es un software de propagación radio (RPS), que proporciona una variedad de funciones para el cálculo de cobertura, interferencia, esparcimientos temporales,...etc. Este simulador trabaja para escenarios tanto exteriores como interiores.

El simulador permite personalizar un entorno de trabajo, en el cual se puede crear o importar objetos, configurar antenas, sistemas de comunicaciones, establecer parámetros del transmisor y receptor, etc. El rango de frecuencias de trabajo va desde 300 MHz hasta los 300 GHz.

Los principales algoritmos de cálculo que usa el software son, el **COST 231 Walfish-Ikegami (WI)**, el cual es un método empírico que trabaja solo con el rayo directo del transmisor, y donde la atenuación depende solo de la distancia, alturas del Tx y Rx, y la distribución de los edificios. Por otro existe el algoritmo de **Ray Tracing y Ray Launching**, el cual es un método mucho más preciso, ya que toma en cuenta los diferentes rayos que se generan entre el Tx y Rx, y de esta manera se pueden calcular las interferencias y coberturas con mayor precisión, aparte de poder calcular el *delay spread* y distribución de ángulos, el inconveniente que se genera con este algoritmo, es la extensa carga de computo, lo que se traduce en enormes tiempos de simulación.



4.2. PRIMER ESCENARIO: INTERFERENCIA DE LTE SOBRE GSM

Para este primer escenario, los transmisores están ubicados a una distancia de 1 km entre ellos, la separación entre canales es de 300 kHz, las antenas de las radio bases se encuentra a 30m de altura.

Separación entre celdas	Potencia LTE	Potencia GSM	Frecuencia de simulación
1 km	37 dBm	37 dBm	900 MHz

El primer paso es ubicar los transmisores y crear una malla de estudio, donde cada recuadro representara un receptor, la resolución de esta malla es de 3m, y la altura con respecto al suelo el de 1,5 m, ver **Figura 22**.

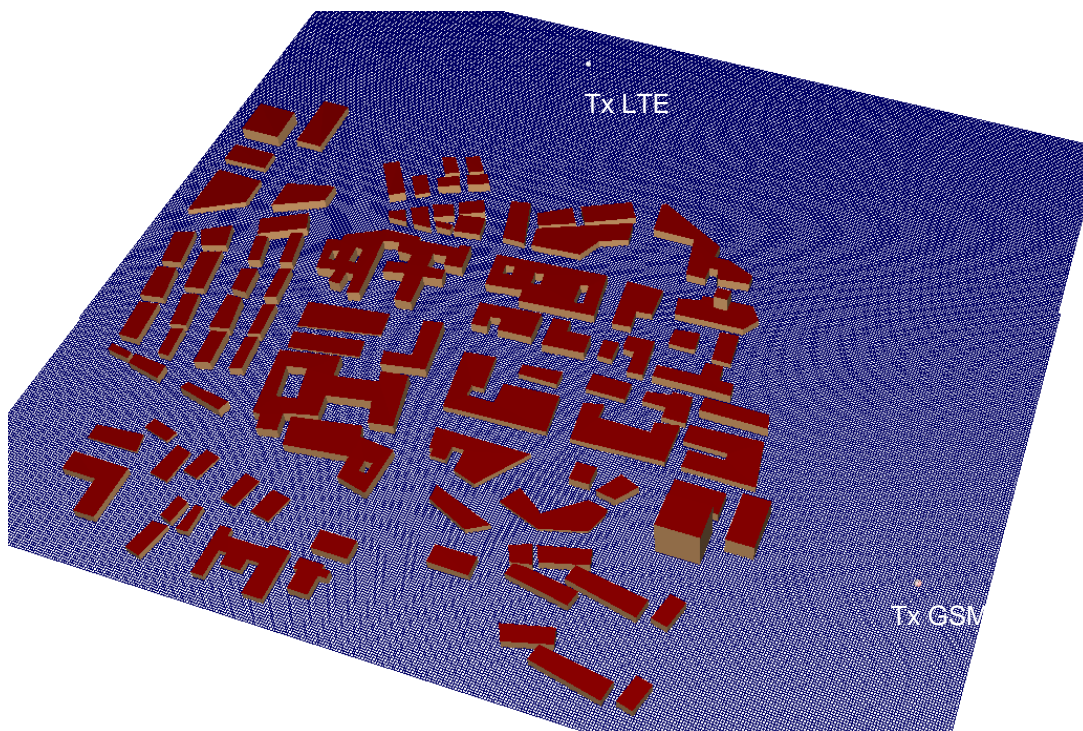


Figura 22.- Transmisores y malla receptora (3m) del escenario 1.

4.2.1. Cobertura de los transmisores

Lo siguiente es el cálculo de la cobertura de cada transmisor por separado, para esto se usa el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami que da un resultado bastante preciso dentro de entornos urbanos. Los resultados de la cobertura se puede ver en las siguientes figuras.

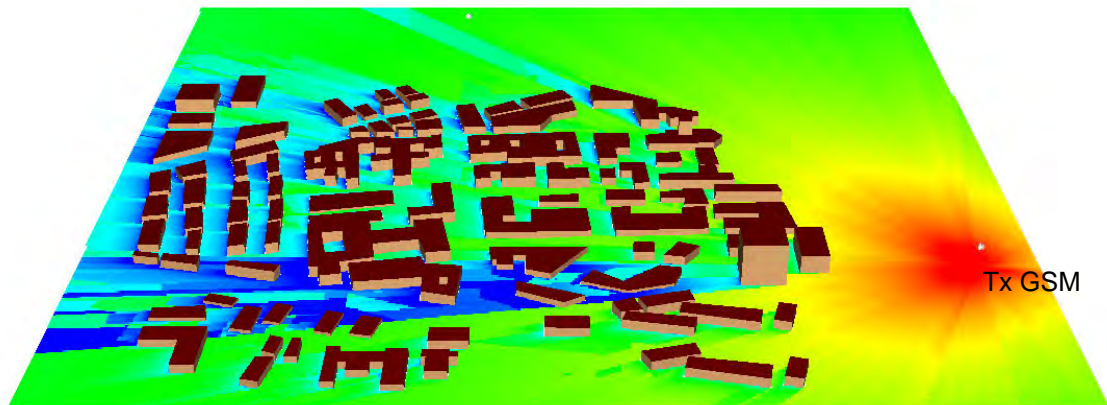


Figura 23.- Cobertura de GSM en el escenario 1.

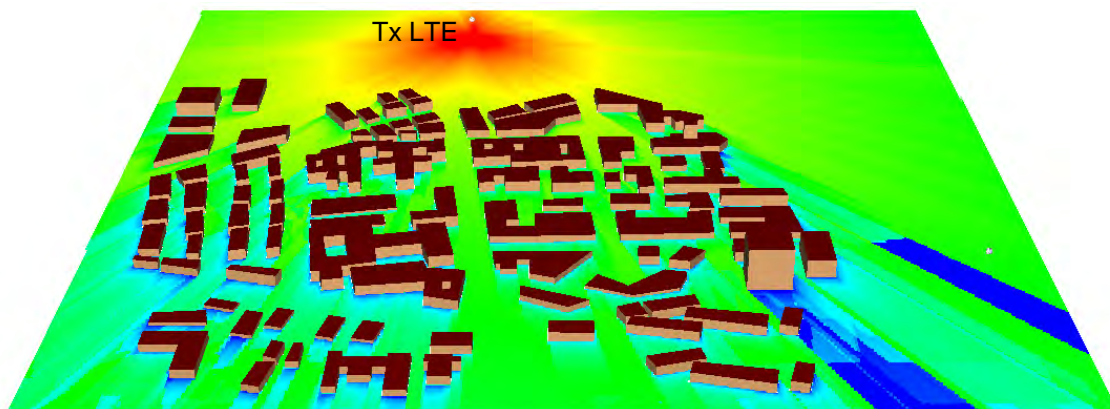


Figura 24.- Cobertura de LTE en el escenario 1.

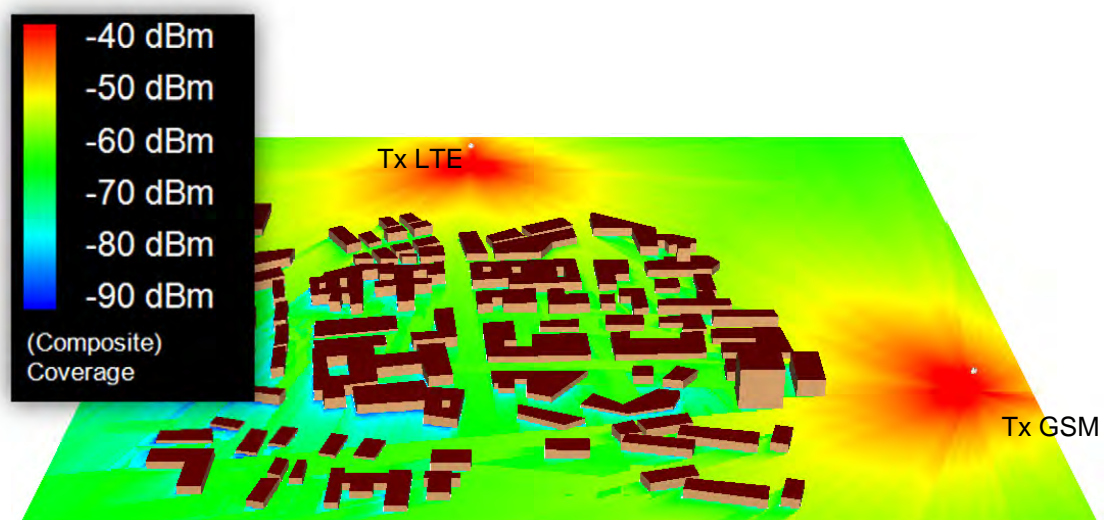


Figura 25.- Cobertura de los dos transmisores en el escenario 1.

Se puede observar de las figuras anteriores que cada transmisor logra cubrir un gran área de cobertura dentro de la ciudad (entre -60 y -70 dBm).

4.2.2. Interferencia co-canal entre los sistemas

Para visualizar la interferencia co-canal de ambos sistemas, se calculó la SIR (Relación Señal a Interferencia), esta simulación no muestra las pérdidas de rendimiento o caudal binario que puede tener el sistema, la SIR en este caso solo muestra cuanta señal de ambos sistemas llega a un mismo punto, independientemente de la frecuencia, suponemos este resultado como interferencia co-canal ya los sistemas transmiten con la potencia máxima (potencia distribuida en el ancho de banda del canal deseado).

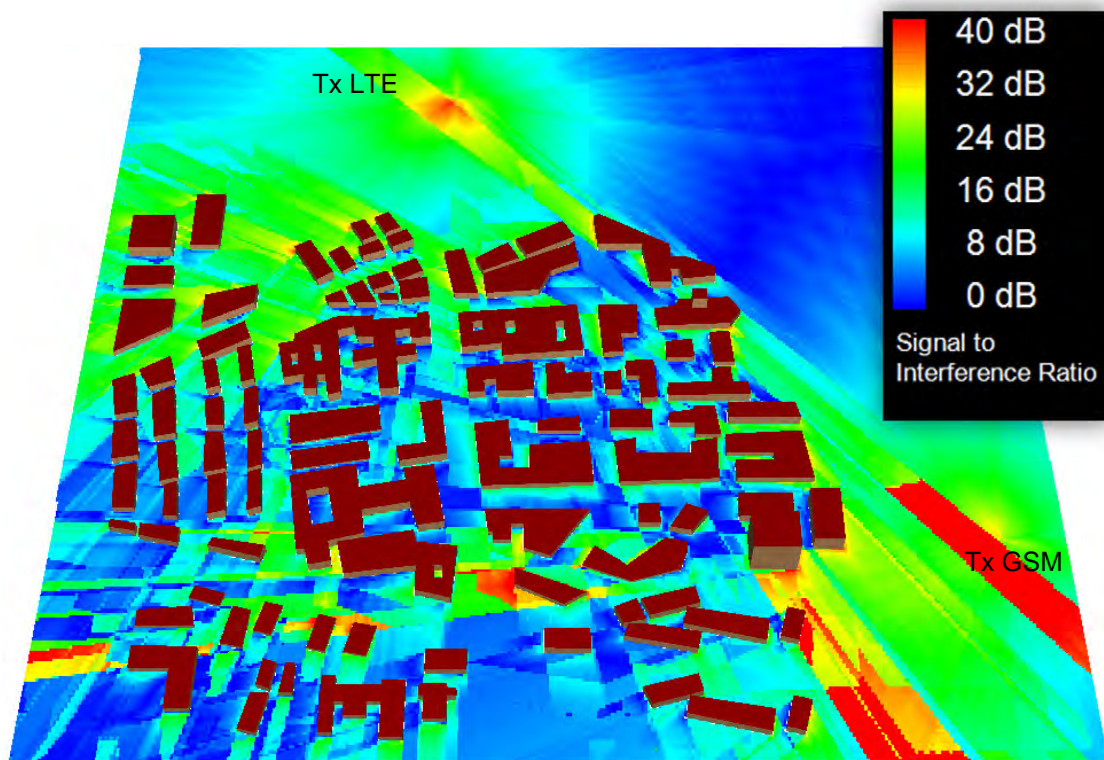


Figura 26.-SIR co-canal entre GSM y LTE en el escenario 1.

Se puede observar en la figura anterior, como ambos sistemas se solapan prácticamente en su totalidad dentro de la ciudad, esto impediría las comunicaciones de GSM ya que este es un sistema sensible a las interferencias.

Por otra parte este escenario es poco probable, ya que se debe hacer una distribución de frecuencia antes de desplegar dos sistemas que trabajen en frecuencias muy cercanas.

4.2.3. Interferencia en el canal adyacente entre los sistemas

Para medir la interferencia en canal adyacente, primero debemos disminuir la potencia del sistema interferente (LTE) entre 30 a 40 dB, de esta manera simulamos la potencia que trasmite LTE en el canal adyacente (Canal deseado GSM) según los parámetros de emisiones fuera de banda (OOB) de este sistema, los resultados se pueden observar en la siguiente figura.

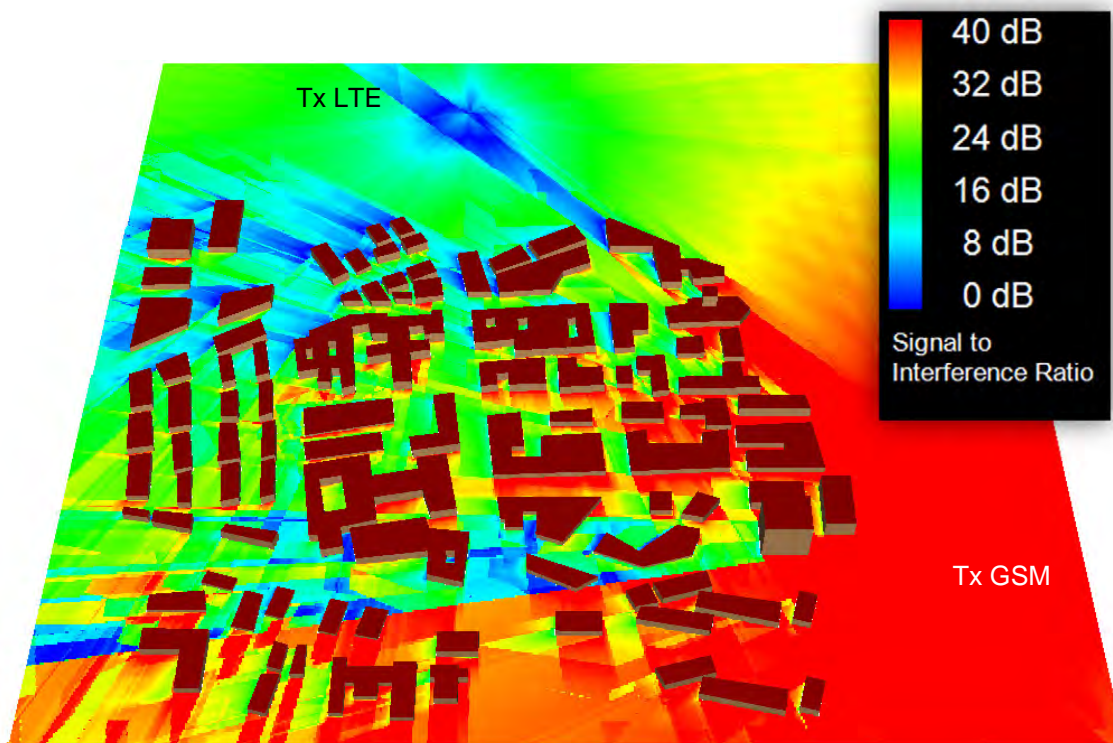


Figura 27.- SIR del canal adyacente, GSM (victima).

Con la relación señal interferencia, que se obtiene con esta nueva potencia de transmisión, se consigue determinar cuanta potencia interfiere exactamente en el canal adyacente, en la **Figura 27** se puede observar que la SIR esta entre 40 a 26 dB en la ciudad, teniendo estos datos y sabiendo que la potencia de GSM que llega en estas zona está entre -60 y -70 dBm (ver **Figura 23**), se puede calcular cuanta potencia interfiere en el canal GSM despejando $P_{LTEi}(dBm)$ de la siguiente ecuación:

$$SIR(dB) = P_{GSM}(dBm) - P_{LTEi}(dBm)$$

Una vez calculada la potencia que interfiere en el canal GSM y teniendo la potencia total que trasmite LTE en ese sector (ver **Figura 24**) se puede calcular para este caso específico la relación interferente en el canal adyacente (ACIR), con la siguiente ecuación:

$$ACIR(dB) = P_{LTE}(dBm) - P_{LTEi}(dBm)$$

Los valores obtenidos se comparan con la gráfica que relaciona el ACIR con el rendimiento de GSM (ver **Figura 11**), para determinar el porcentaje de cortes que tendría el canal GSM en este escenario, los resultados se presentan en **Tabla 16**.

Tabla 16.- Resultados del ACIR en el escenario 1.

$P_{LTE}(dBm)$	$P_{LTEi}(dBm)$	$SIR(dB)$	$ACIR(dB)$	Cortes de GSM
-60	-88	33	28	6%
-63	-101	40	38	~1%

Como caso particular recalculamos la interferencia pero esta vez con un método más potente, el cual se basa en geometría óptica para trazar rayos en el mapa, y de esta manera interactuar con mayor precisión con el entorno, cada rayo posee la información de la polaridad, potencia, retardo, fase y fuente de transmisión de la señal, este método se conoce como *Ray launching* o *Ray tracing* (ver **Figura 28**).

Una malla receptora con mayor resolución (1m) se sitúa en la zona del mapa que se va a estudiar (centro de la ciudad), el área se restringe debido a que estos métodos de cálculo son extremadamente pesados y usan algoritmos muy complejos, entre más receptores hayan más cálculos debe realizar y el tiempo de computo puede ser muy largos, los resultados de la SIR se ven la **Figura 29**.

Los resultados muestran que dentro del área de estudio la SIR esta entre 40 a 8 dB aproximadamente, esto difiere del resultado anterior, ya que en ese caso no se tomaba en cuenta los múltiples trayectos que se generan por la reflexión y difracción al interactuar con los edificios de la ciudad, se puede observar en los cálculos de cobertura que el transmisor LTE (Interferente) tiene visión directa con la zona de estudio, esto hace que llegue mayor potencia y por tanto la interferencia sea mayor.

El método de *Ray launching* o *Ray tracing* se suele usar en entornos reducidos como es el caso de interiores, ya que la cobertura e interferencia juegan un papel más crítico, sin embargo la práctica ha demostrado que para zonas urbanas y rurales los métodos COST 231 dan buenos resultados.

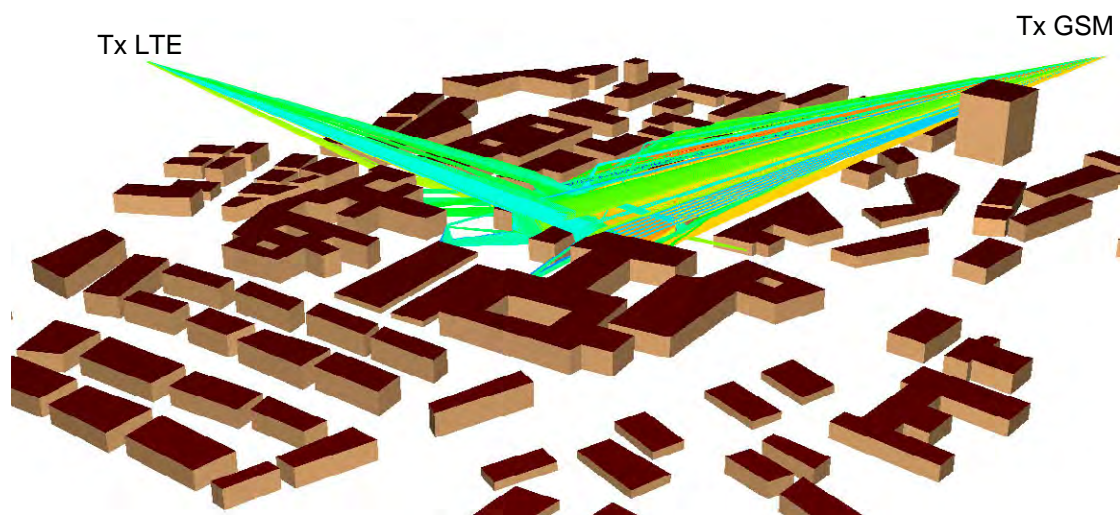


Figura 28.- Cálculo de la SIR con el método de Ray Launching.

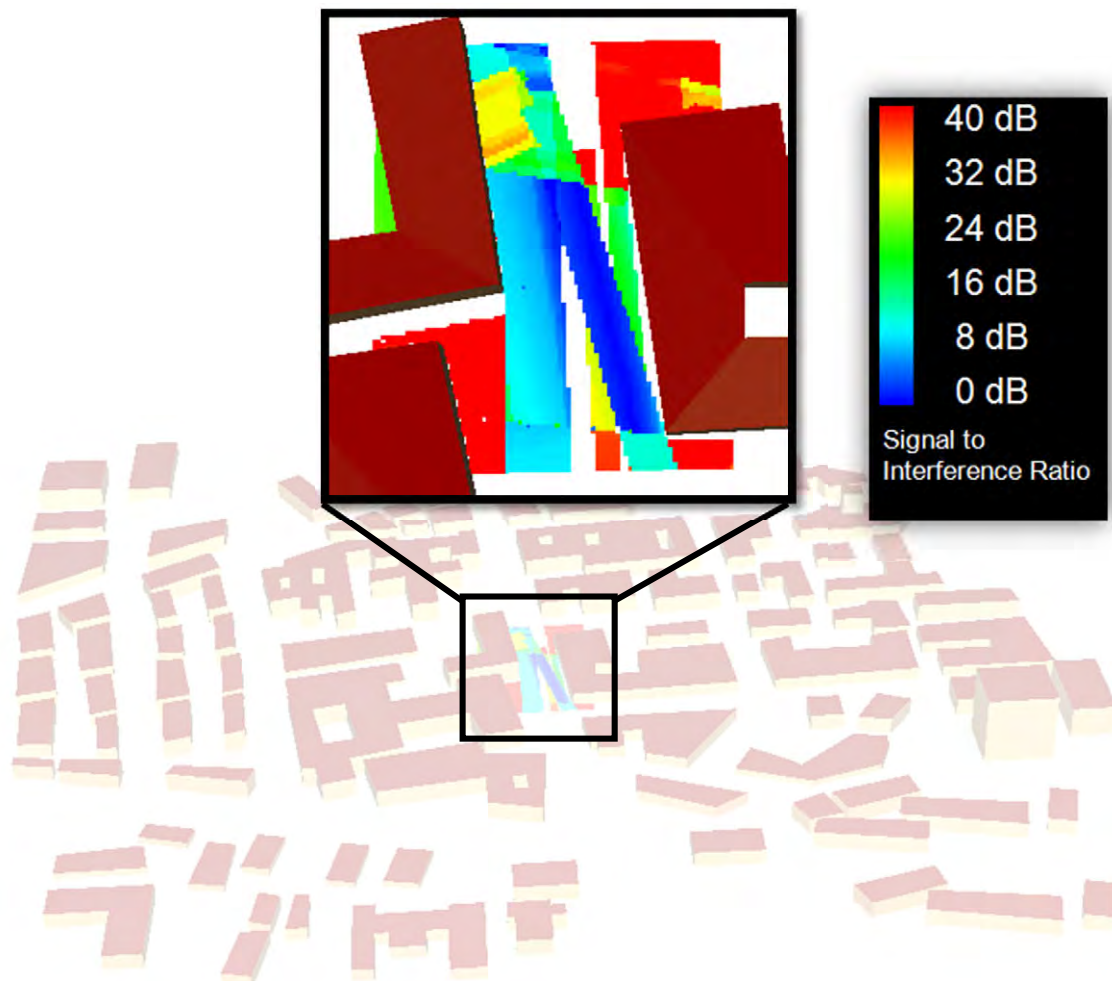


Figura 29.- Interferencia en el canal de GSM en el escenario 1.

4.3. SEGUNDO ESCENARIO: INTERFERENCIA DE LTE SOBRE UMTS

En este segundo escenario se pondrán dos transmisores LTE y un transmisor UMTS a una altura de 30m y separados aproximadamente 500m, la separación entre la portadora LTE y el borde del canal UMTS es de 2,5 MHz, la frecuencia de portadora para esta simulación es de 1800 MHz.

Separación entre BS	Potencia LTE	Potencia UMTS	Frecuencia de simulación
500 m	40 dBm	40 dBm	1800 MHz

La malla receptora es de 3m de resolución y está ubicada a 1,5 m de altura, el montaje del escenario se puede ver en la siguiente figura.

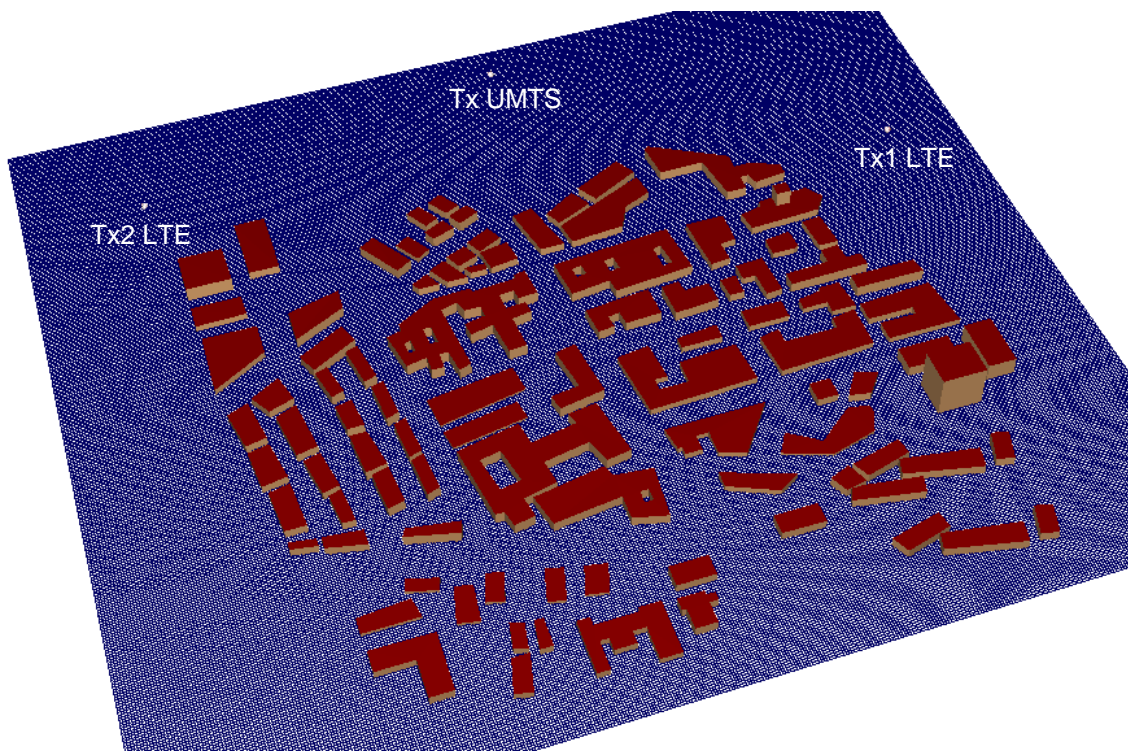


Figura 30.-Transmisores y malla receptora (3m) del escenario 2.

4.3.1. Cobertura de los transmisores

La cobertura al igual que en el escenario 1 se calculó con el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami. En las figuras siguientes se pueden observar los niveles de potencia que proporciona cada transmisor, y la cobertura en conjunto de todas las estaciones base.

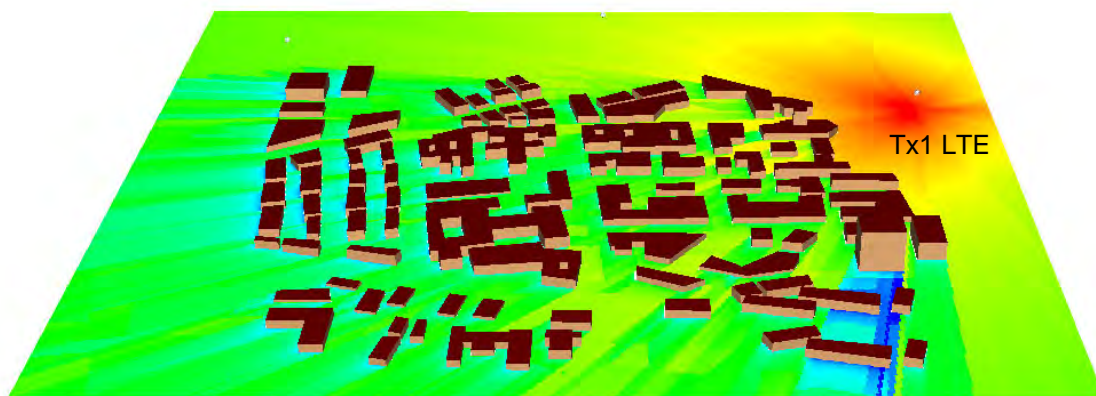


Figura 31.- Cobertura del Tx1 de LTE en el escenario 2.

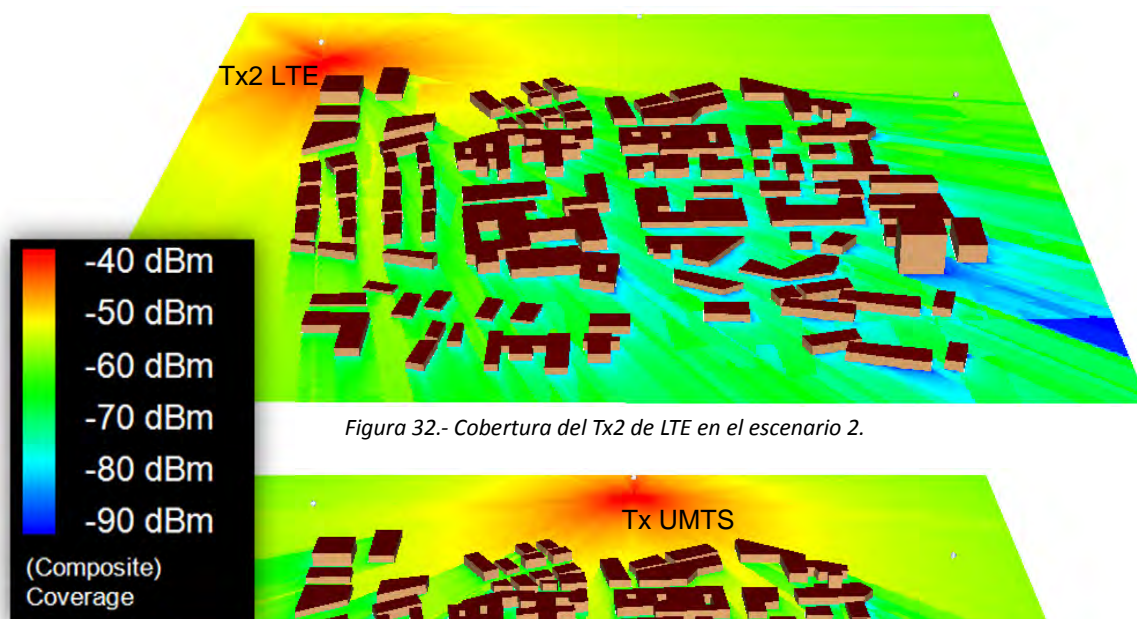


Figura 32.- Cobertura del Tx2 de LTE en el escenario 2.

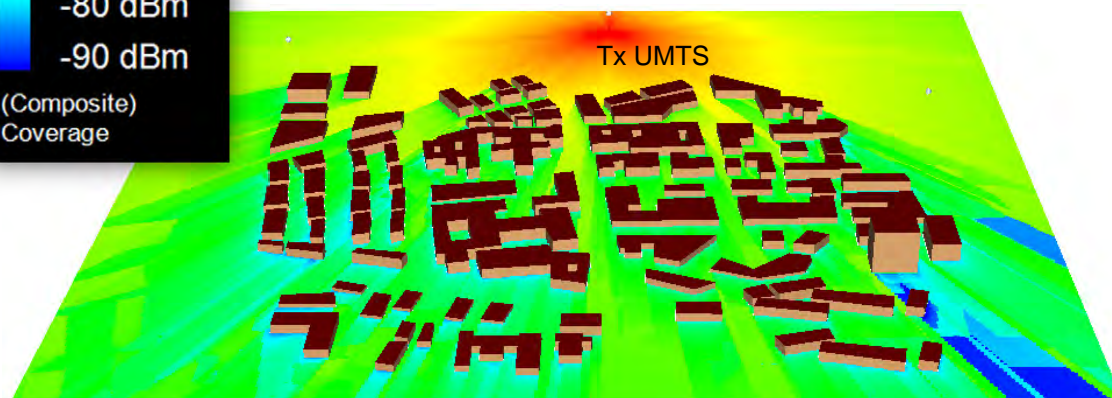


Figura 33.- Cobertura del Tx de UMTS en el escenario 2.

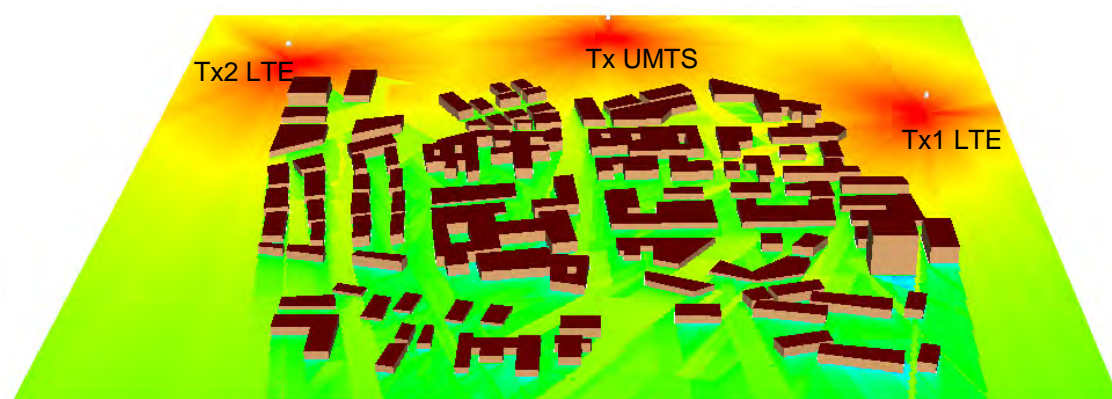


Figura 34.- Cobertura de los dos transmisores en el escenario 2.

Se puede observar en las figuras anteriores, que la potencia que se puede encontrar alrededor de los edificios de la ciudad está entre -60 dBm a -70 dBm, y en los extremos del área de cobertura unos -80 dBm aproximadamente.

4.3.2. Interferencia co-canal entre los sistemas

La interferencia calculada con el COST 231 WI se puede ver en la **Figura 35**, en esta figura se puede observar que la interferencia se concentra en las fronteras entre los transmisores y en toda la zona central de la ciudad (entre 10 a 0 dB), cabe destacar una vez más que esta interferencia es de potencias, no toma en cuenta las frecuencias, es interferencia co-canal ya las estaciones base transmiten con la potencia que tienen en su canal principal.

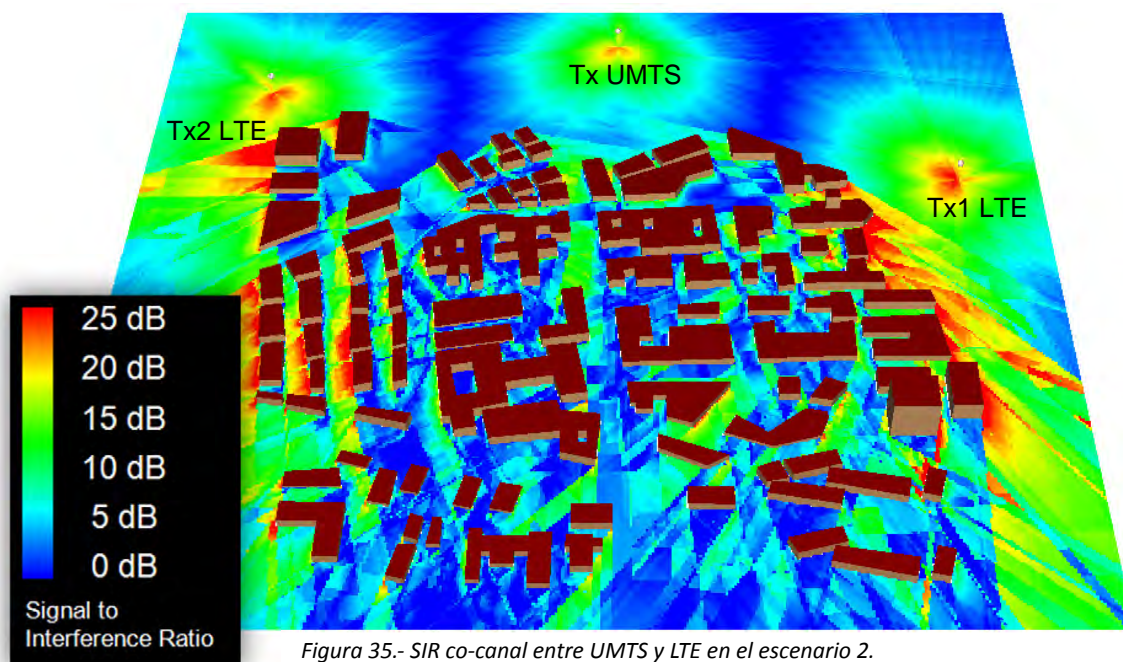


Figura 35.- SIR co-canal entre UMTS y LTE en el escenario 2.

La interferencia co-canal que muestra la figura anterior hace que la comunicación de UMTS sea poco viable, sin embargo UMTS usa técnicas de espectro ensanchado como método de codificación y de acceso múltiple, esto le proporciona cierta robustez ante las interferencias co-canal, pero LTE es un sistema banda ancha que cubre gran parte del espectro y esto causaría interferencia en los receptores ya que captarían gran parte de la señal LTE.

4.3.3. Interferencia en el canal adyacente entre los sistemas

Para determinar la relación interferente en el canal adyacente (en este caso el de UMTS), es necesario disminuir la potencia de los transmisores LTE entre 30 a 40 dB, que son los niveles de ACLR característicos de este sistema, luego se recalcula la SIR para obtener cuanta potencia interfiere dentro del canal UMTS (ver **Figura 36**), esto se logra con las ecuaciones vistas en apartado 4.2.2, y por último se determina el ACIR restando la potencia que transmiten las estaciones base LTE menos la potencia que interfiere dentro del canal UMTS.

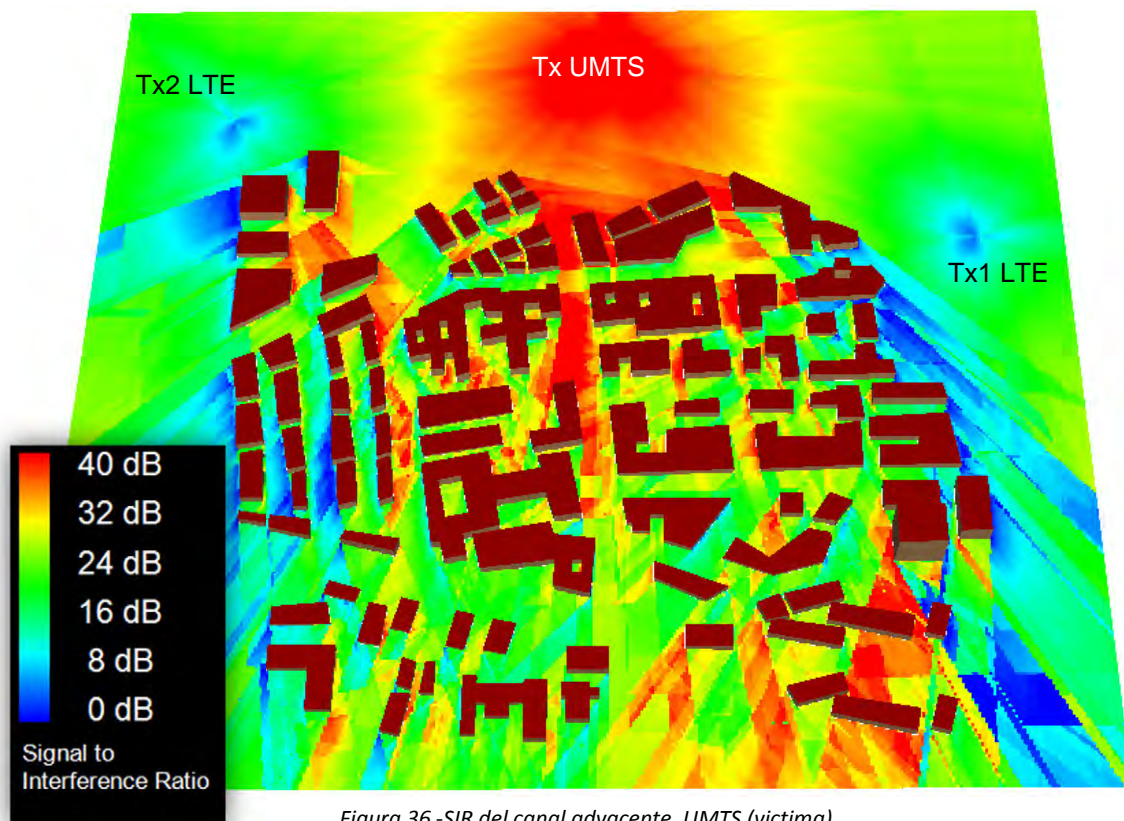


Figura 36.-SIR del canal adyacente, UMTS (victima).

En la figura anterior se observa que la SIR es relativamente alta (entre 26 a 40 dB), hay que tomar en cuenta que son dos transmisores interferentes.

Con los datos de la potencia interferente, y sabiendo la potencia de los transmisores LTE que llega a los receptores, se puede calcular el ACIR, los resultados se comparan con la **Figura 13** y se obtiene la pérdida de la capacidad de UMTS debido a la interferencia de LTE, estos cortes van del 1% a más del 4% (ver **Tabla 17**).

Tabla 17.- Resultados del ACIR en el escenario 2.

$P_{LTE}(dBm)$	$P_{LTEi}(dBm)$	$SIR(dB)$	$ACIR(dB)$	Cortes de UMTS
-57	-87	26	30	4%
-60	-100	40	40	~1%

Para hacer un estudio más detallado, se colocó una malla de mayor resolución (1m) en el centro de la ciudad, y se repitieron los cálculos de SIR pero esta vez con el método de trazado de rayos, de esta manera se puede ver con mayor precisión la interferencia real de LTE a UMTS, los resultados se pueden ver en la **Figura 37**.

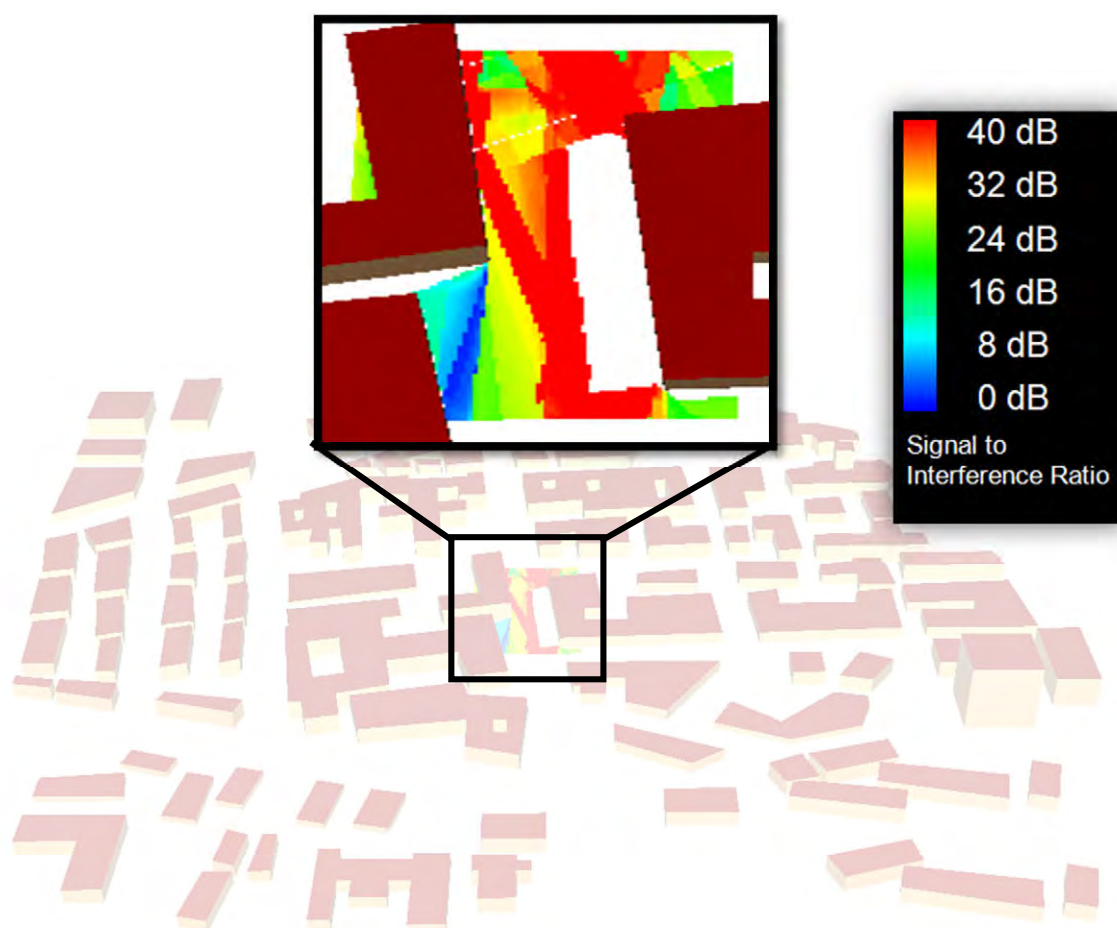


Figura 37.- SIR detallado de la zona de estudio en el escenario 2.

Luego de aumentar la resolución, se observa como la relación señal a interferencia esta entre 40 a 30 dB, e incluso en algunos sectores no registra interferencia (esto se debe a que solo llegan rayos del Tx UMTS), en los bordes de los edificios se puede obtener valores extremos entre 0 a 40 dB, esto debido a la dificultad que tiene la onda para llegar de forma directa.

4.4. TERCER ESCENARIO: INTERFERENCIA ENTRE SISTEMAS LTE

En el tercer escenario se comprobará los niveles de interferencia que generan los sistemas LTE entre sí, para esto se simulan dos pico celdas separadas 525m y una macrocelda a 750m de ellas, este también es el concepto de redes heterogéneas (HetNet) donde un área de cobertura está conformado por una macrocelda y varias picoceldas en su interior.

Separación entre BS	Potencia LTE Macrocelda	Potencia LTE picocelda	Frecuencia de simulación
525/750 m	40 dBm	20 dBm	2000 MHz

La malla receptora es de 3m de resolución y está ubicada a 1,5 m de altura, el montaje del escenario se puede ver en la siguiente figura.

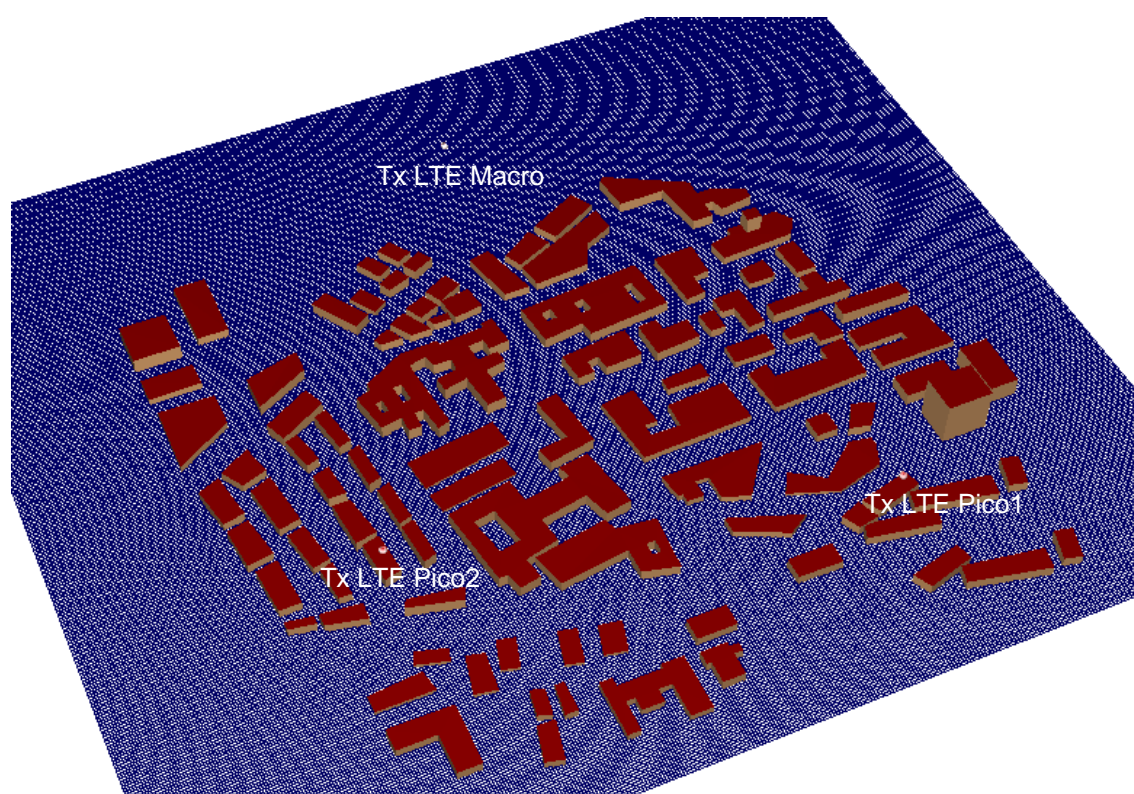


Figura 38.-Transmisores y malla receptora (3m) del escenario 3.

4.4.1. Cobertura de los transmisores

La cobertura al igual que en casos anteriores se calculó con el modelo COST 231 Walfisch-Ikegami. En las figuras siguientes se pueden observar los niveles de potencia que proporciona las picoceldas y la macrocelda, y la cobertura en conjunto de todas las estaciones base.

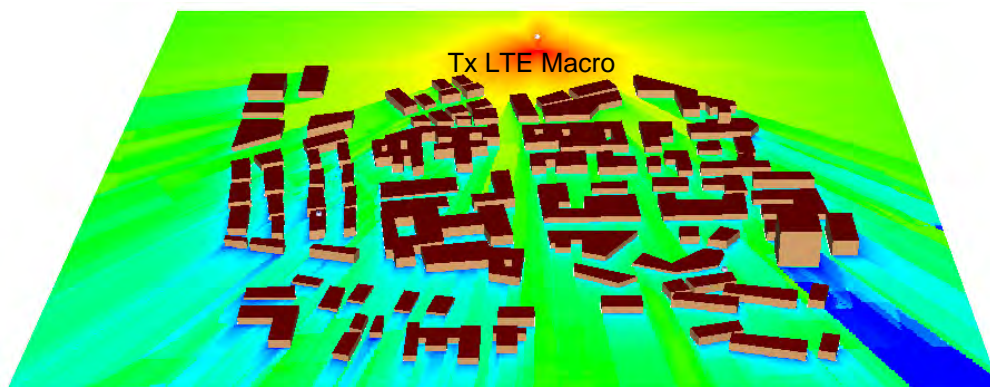


Figura 39.- Cobertura de la macrocelda LTE en el escenario 3.

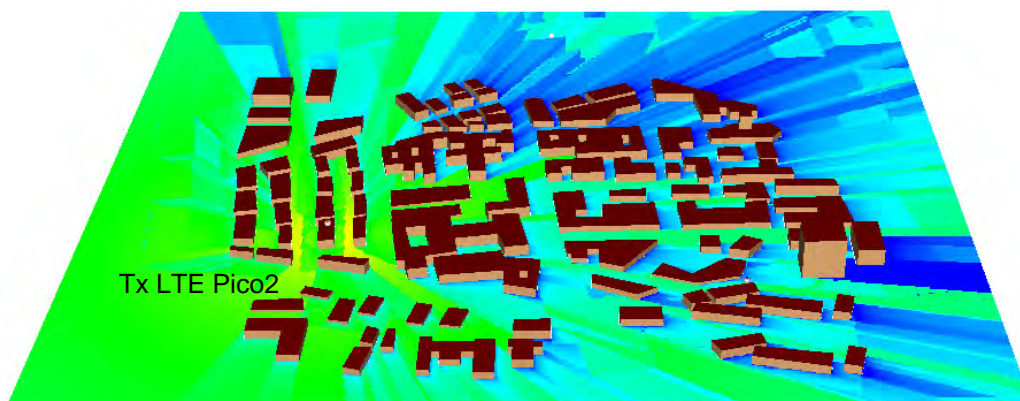


Figura 40.- Cobertura de la picocelda 1 de LTE en el escenario 3.

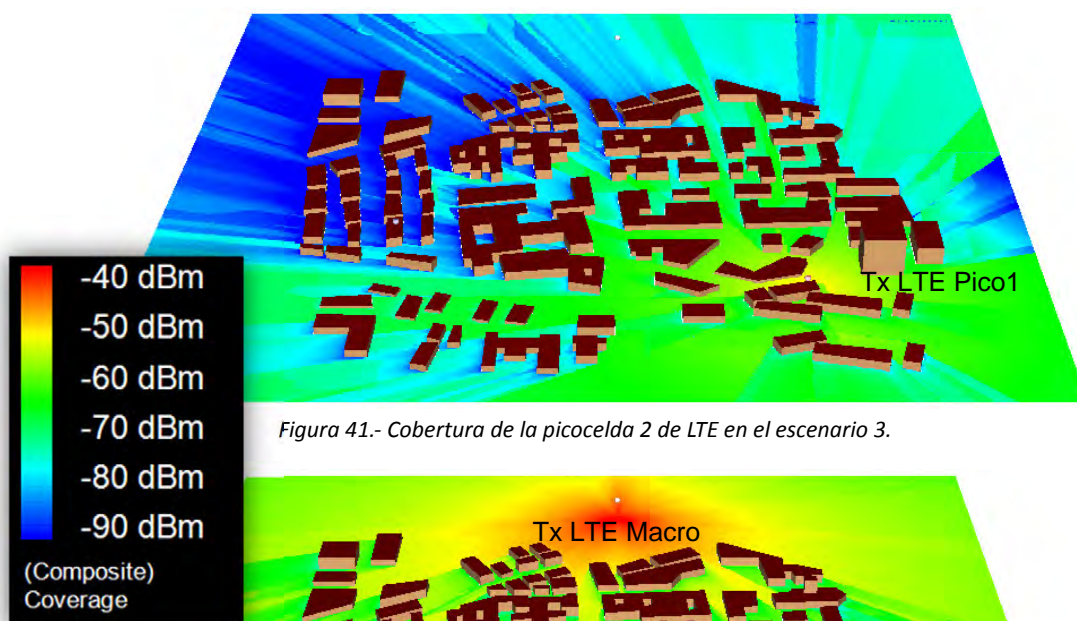


Figura 41.- Cobertura de la picocelda 2 de LTE en el escenario 3.

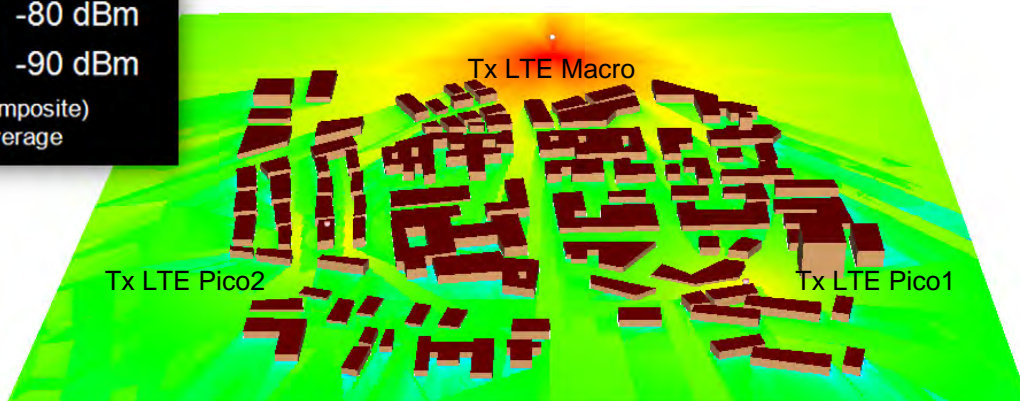


Figura 42.- Cobertura global del escenario 3.

Se puede observar en las imágenes anteriores, como se consigue una cobertura óptima usando macroceldas y picoceldas simultáneamente, la potencia que logra transmitir dentro de su área de cobertura esta entre -60 a -63 dBm.

4.4.2. Interferencia co-canal entre los sistemas

La interferencia co-canal calculara para dos casos, uno de ellos para la interferencia que generan las picoceldas entre sí, y en el otro caso se verá la interferencia que genera la macrocelda con las picocelaras.

Para el primer caso se puede observar en la **Figura 43**, que la relación señal a interferencia es alta en las zonas donde está ubicada cada picocelda, y por el contrario donde ambas señales son débiles la interferencia es muy elevada.

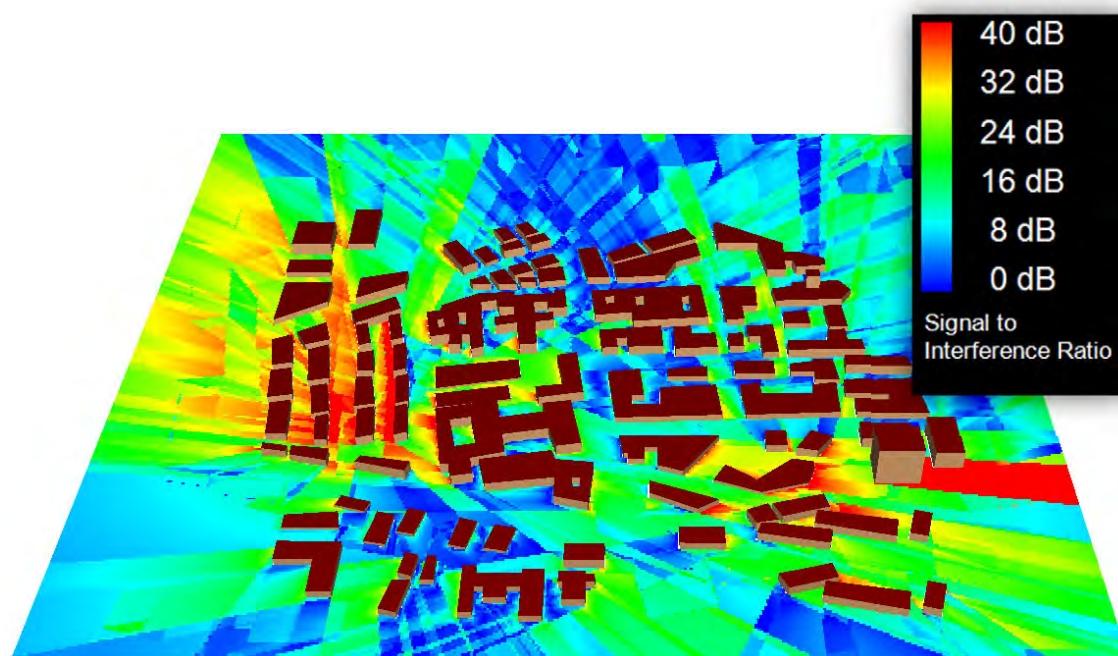


Figura 43.- SIR co-canal entre picoceldas LTE en el escenario 3.

En el segundo caso (Interferencia entre todas las celdas) se puede ver en la **Figura 44**, que la interferencia aumentó en el centro de la ciudad y en las fronteras de las picocelaras, sin embargo se puede observar cómo están delimitadas las tres celdas en el mapa.

La SIR en las zonas cercanas a cada transmisor esta entre 40 a 30 dB, mientras que en los extremos de las zonas de cobertura, la SIR esta entre 12 a menos de 3 dB.

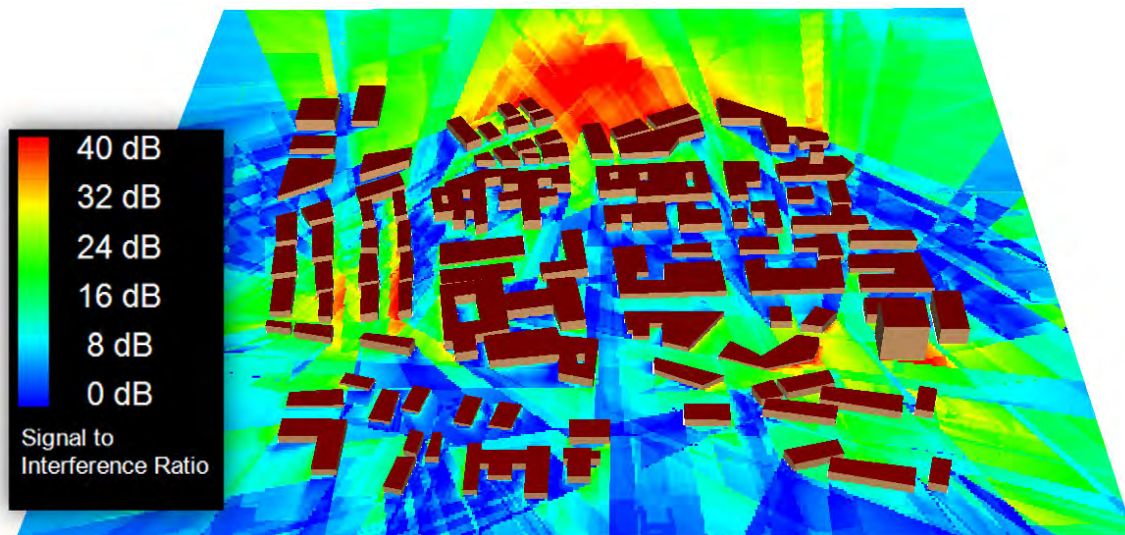


Figura 44.- Interferencia co-canal entre todas las celdas en el escenario 3.

4.4.1. Interferencia en el canal adyacente entre los sistemas

Para medir la interferencia en canal adyacente, primero disminuimos la potencia del sistema interferente (LTE Macrocelda) entre 30 a 40 dB, estos datos según los parámetros de LTE, de esta manera simulamos la potencia que trasmite la macrocelda en el canal adyacente (Canal deseado en las picoceldas), los resultados se pueden observar en la siguiente figura.

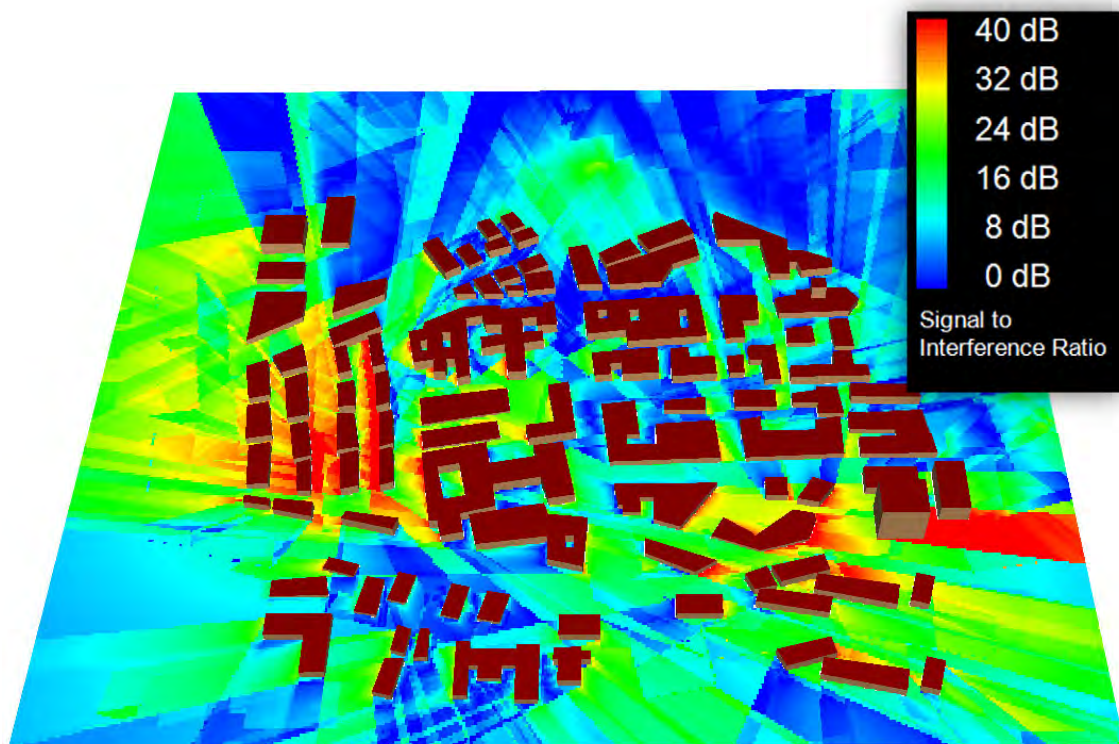


Figura 45.- Interferencia en el canal adyacente entre picocelda (victima) y macrocelda.

La figura anterior muestra un resultado muy similar al caso donde solo transmiten las picoceldas (**Figura 43**), la SIR en el centro de cada picocelda esta entre 30 a 40 dB, mientras que en los bordes baja entre 24 a menos de 8 dB.

Para observar el caso contrario, se disminuye la potencia en las picoceldas para simular las transmisiones fuera de banda que interfieren en el canal adyacente (Canal de la Macrocelda), el resultado se puede ver en la figura siguiente.

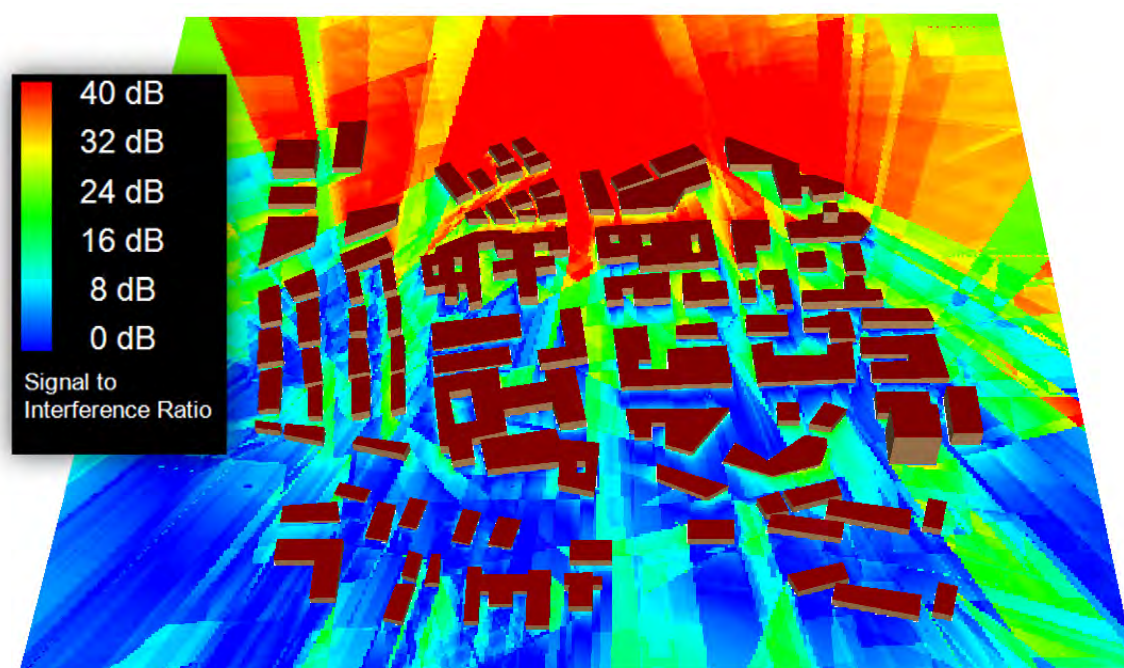


Figura 46.- Interferencia en el canal adyacente entre macrocelda (victima) y picocelda.

Viendo los dos casos anteriores se puede concluir que pueden coexistir ambos sistema LTE en la mayoría de la ciudad, ya que las zonas con una SIR baja son pocas (los extremos), de igual forma, para este tipo de configuración se asignan frecuencias diferentes entre los extremos de las celdas y las zonas cercanas al transmisor, o en caso de LTE se asignan bloques de recursos diferentes.

Los resultados obtenidos se comparan con la **Figura 15**, y los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 18.- Resultados del ACIR en el escenario 3.

$P_{LTE}(dBm)$	$P_{LTEi}(dBm)$	$SIR(dB)$	$ACIR(dB)$	Cortes de LTE_{pico}
-63	-80	30	20	8%
-70	-91	40	24	5%
-58	-84	24	26	~3%
-60	-74	8	14	<12%

Para detallar la interferencia que genera la macrocelda sobre las picoceldas, se van a colorar receptores de mayor resolución (1m) en la intersección de las tres celdas (centro de la ciudad) y en la ubicación de las picoceldas, el método para el cálculo de la SIR será *Ray Launching*.

Los resultados de la **Figura 47** Error! No se encuentra el origen de la referencia., muestra que la mayor interferencia se genera, como era de pensar en la intersección de las tres celdas, donde la SIR oscila entre 22 dB hasta menos de 10 dB, en el área de las picoceldas la SIR es considerablemente mayor y va desde 12 dB has más de 25 dB (30 ~ 33 dB).

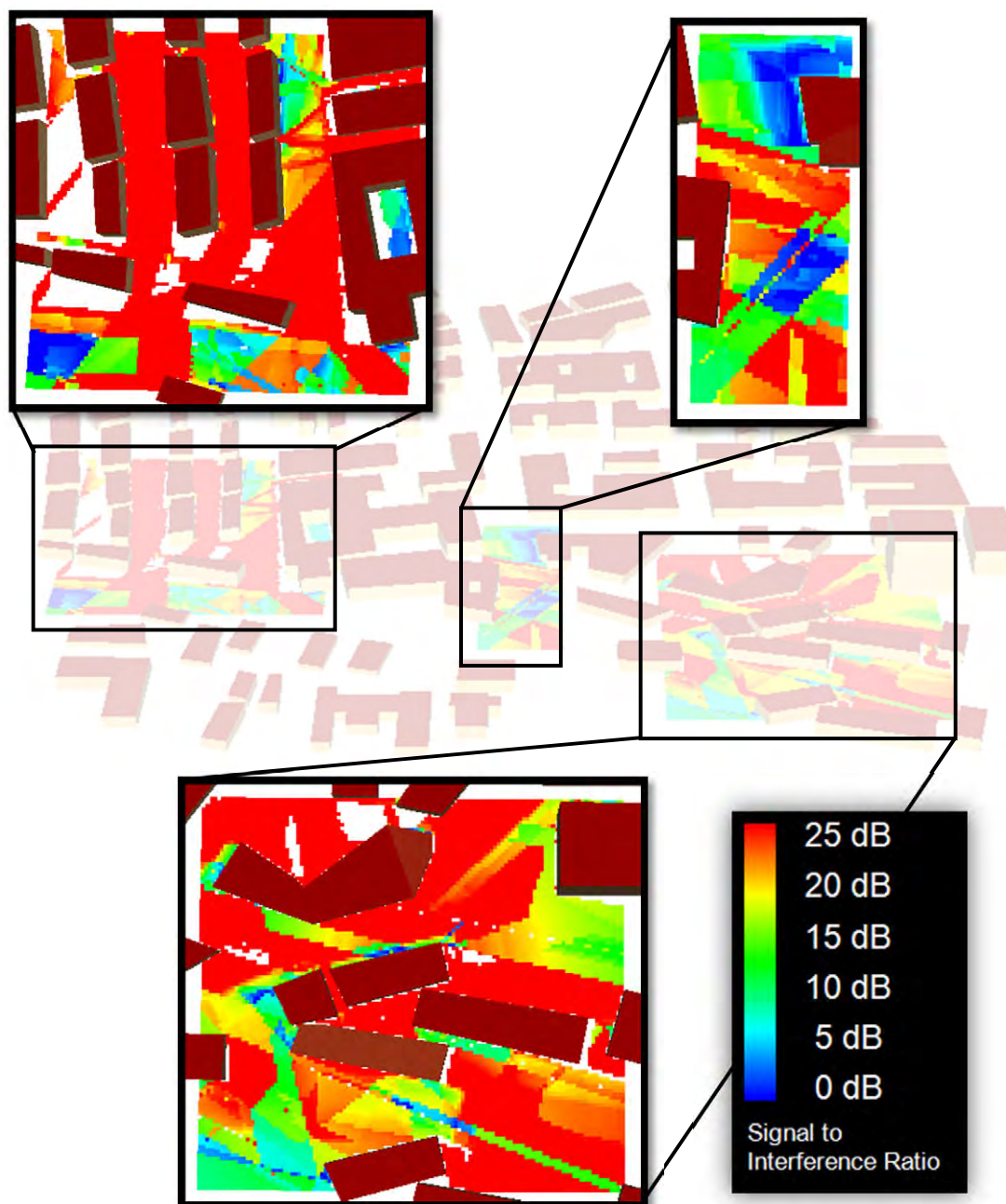


Figura 47.-Interferencia en el canal LTE en las picoceldas y en la intersección de las celdas en el escenario 3.

5 CONCLUSIONES

Luego de estudiar las medidas de interferencia del canal adyacente entre LTE y otros sistemas de comunicaciones celular, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

LTE vs GSM (victima), en este caso la interferencia en el canal adyacente no afecta en gran medida a GSM, el ACIR (30 dB) está alrededor de lo especificado por la 3GPP para que puedan coexistir. En la mayoría de los casos la pérdida de rendimiento es menor al 6%. También hay que mencionar, que GSM es un sistema banda estrecha, y por tanto, concentra su potencia en un ancho de banda muy estrecho comparado al de LTE, el cual es un sistema de banda ancha. Esto le da cierta ventaja a la hora de calcular la relación señal interferencia (SIR).

LTE vs UMTS (victima), para este escenario se puede concluir que los niveles de interferencia son significativamente bajos, debido a que los resultados del ACIR están por encima de los 30 dB. Con esto podemos asegurar pérdidas menores al 5% del caudal binario de UMTS. En este escenario se observa el efecto del entorno urbano, ya que los edificios en los extremos de la ciudad bloquean parte de la señal UMTS y se consigue altos niveles de interferencia, también hay que tomar en cuenta el diagrama de radiación de la antena, que puede perder cerca de 3 dB de ganancia en estas zonas de la ciudad.

Por otra parte, UMTS usa técnicas de espectro ensanchado WCDMA, que le permiten al sistema funcionar bajo interferencia.

LTE vs LTE, en este escenario se intentó simular una red heterogénea con una macrocelda y dos picoceldas en su interior. Este esquema es el más recomendado para dar cobertura de LTE. La red puede estar también formada por femtoceldas en interiores de edificios.

Los resultados muestran una variedad de casos de interferencia, donde el peor de ellos presenta un ACIR de 14 dB, lo cual generará pérdidas cercanas al 12%. En

las zonas cercanas a las estaciones base se consiguen pérdidas inferiores al 2%, pero el valor más frecuente ronda los 24 dB de ACIR, los cuales generan pérdidas del 5% del rendimiento.

El problema de la interferencia en los bordes de cobertura se solventa con métodos como el ICIC, el cual asigna bloques de recursos distintos a los usuarios ubicados en las intersecciones de cobertura, y reutiliza los recursos en las zonas de menor interferencia.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Erik Dahlman, “*3G Evolution HSPA and LTE for Mobile Broadband*” 2008. (Elsevier)
- [2] Electronic Communications Committee (ECC), “*Compatibility between UMTS 900/1800 and systems operating in adjacent bands*”, Krakow: Marzo 2007. (ECC Report 96).
- [3] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios*”, Octubre 2012. (3GPP TR 36.942 v11).
- [4] Mobile Telecommunications: Telecom Technology Evolution. (s.f.) obtenido de <http://sites.tcs.com/insights/perspectives/enterprise-mobility-telecommunications-telecom-technology-evolution#.UcvRUfIT7kp>.
- [5] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), “*Compatibility between LTE and WiMAX operating within the bands 880-915 MHz / 925-960 MHz and 1710 – 1785 MHz / 1805-1880 MHz (900/1800 MHz bands) and systems operating in adjacent bands*”, Noviembre 2010. (CEPT Report 41).
- [6] Electronic Communications Committee (ECC), “*Practical mechanism to improve the compatibility between GSM-R public mobile networks and guidance on practical coordination*”, Montegrotto Terme: Mayo 2011. (ECC Report 162).
- [7] Andy Barnard, Ofcom, “*UMTS900 – GSM Interference Measurements*”, Junio 2011. (ref.: REDW_CON_1622).
- [8] International union of railways, “*Report on interference to GSM*”, Mayo 2012. (No. O-8700).
- [9] WiMAX Forum, “*Mobile Radio Specification*”, Abril 2011. (WMF-T23-005)
- [10] *Cellular Telecommunications and Cell Phone Technology*. (s.f.), Obtenido de <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/>.
- [11] Dahlman, Erik. “*4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*”, 2011. (Elsevier)

- [12] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks, "*Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*", Febrero 2006.
- [13] Dr. J.Hübner, "*Radiowave Propagation Simulator – Radio Plan*" Año 2008. (Actix GmbH).
- [14] Ashley Mills, "*Understanding Static Inter-Cell Interference Coordination Mechanisms in LTE*", Julio 2011. (Journal of communications).